

Roteamento Baseado na Trajetória para Redes Veiculares Desconectadas com Múltiplos Gateways

Vitor Borges C. da Silva, Fábio Oliveira B. da Silva,
Miguel Elias M. Campista e Luís Henrique M. K. Costa

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/GTA - DEL/POLI

{borges, fabio, miguel, luish}@gta.ufrj.br

Resumo. *Este trabalho propõe uma arquitetura para cenários formados por redes sem-fio veiculares desconectadas e pontos de acesso à rede cabeada distribuídos (drive-thru Internet). A arquitetura proposta lida com a mobilidade dos usuários com conexão intermitente utilizando um protocolo de encaminhamento de mensagens tolerante a atrasos e desconexões. Para evitar replicações de mensagens na rede cabeada, é proposto um protocolo de roteamento que combina roteamento estático e epidêmico, assim como um mecanismo baseado na trajetória dos veículos. Experimentos mostram que a proposta reduz o tráfego na rede híbrida e é transparente para as aplicações dos usuários em relação à mudança de ponto de acesso à rede.*

Abstract. *This paper proposes an architecture for scenarios composed of disconnected vehicular wireless networks and distributed access points connected to the wired infrastructure (drive-thru Internet). The proposed architecture deals with users' mobility with intermittent connectivity using a message forwarding protocol which tolerates delays and disconnections. To avoid message replication in the wired network, we propose a routing protocol that combines static with epidemic routing, as well as a trajectory-based mechanism. Experimental results show that the proposal reduces the traffic in the hybrid network and is transparent for users' applications concerning changes to the network access point.*

1. Introdução

Atualmente, os usuários desejam ficar conectados à rede em todo lugar e a todo o momento. O aumento mundial das vendas de dispositivos móveis revela tal fenômeno [Weissberger, 2012]. A tecnologia mais usada para usuários móveis acessarem à Internet é a telefonia celular 3G/4G. No entanto, a alta utilização sobrecarrega a rede celular, fazendo que as operadoras adotem técnicas para descarga de dados. Nessa direção, o uso de redes oportunistas torna-se uma alternativa promissora [Han et al., 2010].

Entre as redes oportunistas, o IEEE 802.11 é uma tecnologia de baixo custo com ampla aceitação. As redes IEEE 802.11 podem ser usadas em redes veiculares, nas quais os usuários móveis obtêm conectividade com a Internet através de comunicações por múltiplos pontos de interconexão (*gateways*). Tal cenário é conhecido também por *drive-thru Internet* [Ott e Kutscher, 2005]. Os usuários dentro de veículos se conectam às unidades de acostamento (UAs), que oferecem serviços de rede através de *gateways* para a infraestrutura cabeada. Embora muito benéfica, a adoção das redes veiculares em larga

escala ainda é um desafio. A arquitetura de rede é composta por ilhas de conectividade, delimitadas pelo alcance do rádio de cada UA. Com isso, a conectividade dos veículos é intermitente e de curta duração. Assim, os usuários podem experimentar interrupções de serviço, e comunicações fim-a-fim podem não ser estabelecidas, compondo um cenário de redes tolerantes a atrasos e desconexões (DTN) [Scott e Burleigh, 2007].

As DTNs usam comutação de mensagens com transferência de custódia para contornar a conectividade intermitente. Ao invés de encaminhar as mensagens recebidas, os nós intermediários as armazenam e as replicam ao encontrar um contato oportunista. Na abordagem trivial, os nós replicam as mensagens epidemicamente para todos os nós encontrados até alcançar o destino ou expirar um temporizador. Essa abordagem é válida em cenários onde nenhuma informação está disponível, mas é ineficiente sob o ponto de vista da sobrecarga de mensagens [Spyropoulos et al., 2008a, Spyropoulos et al., 2008b]. Soluções menos triviais reduzem a sobrecarga de mensagens, usando de estratégias estatísticas [Burgess et al., 2006] ou geográficas [Cheng et al., 2010]. Em cenários *drive-thru*, se os usuários móveis não permanecerem conectados a uma UA por tempo suficiente, o problema de conectividade ocorrerá devido a mobilidade dos nós. Deve-se considerar a infraestrutura híbrida para prover um serviço de qualidade aos usuários móveis.

As principais contribuições desse trabalho são: (i) uma arquitetura híbrida para lidar com a mobilidade dos usuários em cenários *drive-thru*, incluindo uma versão adaptada das DTNs na infraestrutura cabeada; (ii) um protocolo de roteamento DTN adaptado que combina o uso dos roteamentos estático e epidêmico nas redes cabeada e sem-fio, respectivamente; e (iii) um mecanismo baseado na trajetória para reduzir o tráfego de dados na infraestrutura cabeada e na rede sem-fio. Os resultados mostram que é possível prover serviços transparentes aos usuários móveis usando encapsulamento DTN na rede cabeada. A arquitetura híbrida reduz o tráfego nas redes cabeada e sem-fio, na rede cabeada através do roteamento estático e na sem-fio através da diminuição do tráfego de controle.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o cenário abordado. A Seção 3 apresenta as contribuições deste trabalho, enquanto a Seção 4 fornece os detalhes da arquitetura proposta. A Seção 5 apresenta o ambiente de testes. Os experimentos conduzidos e os resultados obtidos são descritos na Seção 6. Finalmente, a Seção 7 conclui este trabalho e apresenta as direções futuras.

2. Problema Abordado

As redes veiculares baseadas no padrão IEEE 802.11 com conexão intermitente utilizam frequentemente as DTNs como solução para lidar com a ausência de caminhos fim-a-fim. Nas DTNs, os nós mantêm a custódia das mensagens e as transferem em *bundles* ao encontrar outros nós. Independentemente se há alguma seletividade na operação, o procedimento não é apropriado para suportar requisitos de interatividade. Ao adicionar a infraestrutura representada pelos múltiplos pontos de interconexão (*gateways*), os veículos podem ter acesso aos serviços de rede se o cenário em questão for explorado de maneira que os usuários não percam a conectividade. Neste trabalho, os termos mensagens e *bundles* são usados de forma intercalada.

2.1. Cenário híbrido

Os protocolos DTN não foram projetados originalmente para redes híbridas, onde as redes com e sem-fio estão interconectadas. Portanto, em cenários *drive-thru*, os

usuários executam os procedimentos de descoberta e de associação à infraestrutura cabeada ao mudar de ilha de conectividade. Caso uma conexão esteja ativa, ela é interrompida assim que o usuário móvel mudar de rede. Esse problema é uma consequência do modelo da Internet, que não levou em conta a mobilidade dos nós em seu projeto original [Saucez et al., 2009].

As redes tolerantes a atrasos e desconexões podem prover serviços de rede para usuários sem-fio móveis, desde que o serviço não exija conexão fim-a-fim. Consequentemente, a execução dos protocolos das redes tolerantes a atrasos e desconexões na rede cabeada pode ser considerada uma solução para lidar com a mobilidade. No entanto, a desvantagem dessa solução é o uso de protocolos do tipo epidêmico na rede cabeada, que leva a replicações desnecessárias de mensagens. Nesse cenário, se um usuário móvel enviar uma requisição à Internet, essa seria replicada por todos os nós a partir da UA mais próxima. Logo, uma alternativa que considere a mobilidade dos usuários bem como a combinação de redes sem-fio sem garantias de conectividade e utilização eficiente da infraestrutura cabeada ainda é uma questão em aberto.

3. Drive-thru Internet em Redes Híbridas

Este artigo propõe um protocolo de roteamento para redes híbridas que combinam redes sem-fio sem garantias de conectividade com redes infraestruturadas com múltiplos *gateways*. O objetivo é oferecer suporte à mobilidade dos usuários nas mudanças de ponto de acesso e períodos de desconexão. Para tal, estende-se o uso das redes DTN, inicialmente usadas na rede sem-fio, para a infraestrutura cabeada. A arquitetura resultante emprega roteamento epidêmico na parte sem-fio e roteamento estático com informações da trajetória dos usuários móveis na parte cabeada. A combinação de roteamento estático e informações sobre trajetória evita a replicação de mensagens (*bundles*) na rede cabeada.

3.1. Arquitetura proposta

A Figura 1 descreve a arquitetura proposta onde usuários móveis dentro de veículos usam conexões oportunistas para troca de dados através de redes IEEE 802.11. A arquitetura é composta de quatro entidades: o usuário móvel no interior do veículo, o veículo com o equipamento sem-fio, a Unidade de Acostamento (UA) e a Central. O usuário e o veículo estão na rede sem-fio, enquanto a Central está na parte cabeada. A UA é responsável por interconectar a rede sem-fio com a infraestrutura cabeada.

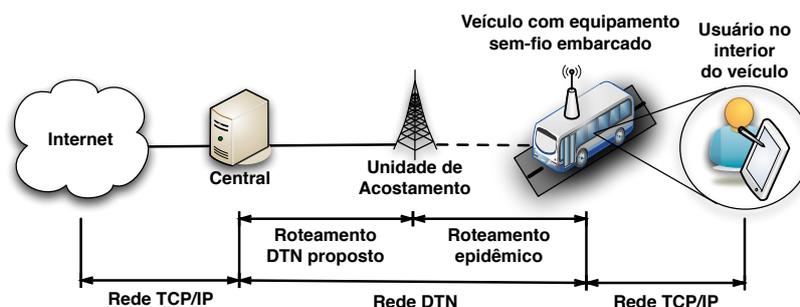


Figura 1. A arquitetura proposta: usuário móvel dentro do veículo, veículo com equipamento sem-fio embarcado, Unidade de Acostamento (UA) e Central.

Assume-se que os usuários executam aplicações com algum nível de interatividade, mas não de tempo real. As aplicações não precisam ser modificadas, sendo mantida compatibilidade com aplicações atuais da Internet com transparência aos usuários, graças ao equipamento sem-fio embarcado no veículo que desempenha o papel de entrada na rede DTN, encapsulando e desencapsulando os dados enviados e recebidos pelos usuários, respectivamente. A premissa da existência de equipamentos capazes de interconectar as redes TCP/IP com as redes DTN é mais simples que a implementação de aplicações de usuários específicas para cenários com conexão intermitente. No caso de transporte público como ônibus, um único roteador sem-fio embarcado poderia intermediar as comunicações de diversos usuários com a Internet.

Uma entidade que intermedeie a comunicação entre a rede DTN e a Internet também é necessária. Essa é a tarefa da Central, que recebe os *bundles* de todos os usuários móveis, os desencapsula e os envia para a Internet. No sentido inverso, a Central recebe as respostas da Internet, as encapsula e as envia para os usuários móveis. Usando a rede DTN, é possível lidar com a mobilidade em cenários *drive-thru*. O problema da correlação do endereço IP com a topologia da rede é contornado pelo encaminhamento de dados baseado em identificadores DTN. Para a rede DTN, os nós de origem e destino são os veículos e não os usuários dentro deles. Assim, localizar um usuário móvel na rede sem-fio significa determinar o veículo no qual ele está se deslocando. A comunicação do roteador sem-fio do veículo com o usuário é feita usando a pilha TCP/IP, de forma transparente para os usuários.

3.2. Roteamento híbrido

O roteamento epidêmico é adequado a cenários onde não há nenhuma informação sobre vizinhança dos nós. Entretanto, na parte cabeada da arquitetura híbrida, os nós são estáticos. Logo, um esquema de roteamento estático é aplicado para conectar a Central às UAs. De fato, implementações DTN oferecem tal opção, que é utilizada para evitar replicação desnecessária de mensagens em redes estáticas. Assim, pode-se ajustar as configurações do roteamento de acordo com a rede. Uma observação importante é a preservação do identificador DTN em ambas as redes, isto é nas redes sem-fio e cabeada, que é importante para a mobilidade. Na arquitetura proposta, cada UA deve lidar com o roteamento estático e epidêmico, em suas interfaces cabeada e sem-fio, respectivamente. A implementação será detalhada na Seção 4.

3.3. Redução da replicação de mensagens

Embora a utilização do roteamento estático possa reduzir a replicação de mensagens na rede cabeada, a posição do usuário móvel na rede ainda é desconhecida. Assim, mesmo usando o roteamento estático, no pior dos casos, a Central teria que enviar a mesma mensagem para todas as UAs. A estimativa da posição do veículo pode, portanto, reduzir ainda mais o número de mensagens transmitidas na rede cabeada, já que a Central se torna capaz de identificar as UAs mais próximas ao destino móvel. Portanto, as mensagens destinadas aos nós na rede móvel não precisam ser encaminhadas a todas as UAs, mas apenas a um subconjunto de UAs selecionadas conforme a trajetória estimada dos veículos.

Nas redes DTN, os nós trocam informações sobre as mensagens (*bundles*) que já possuem antes da troca efetiva para evitar replicação. Já que a Central encaminha as

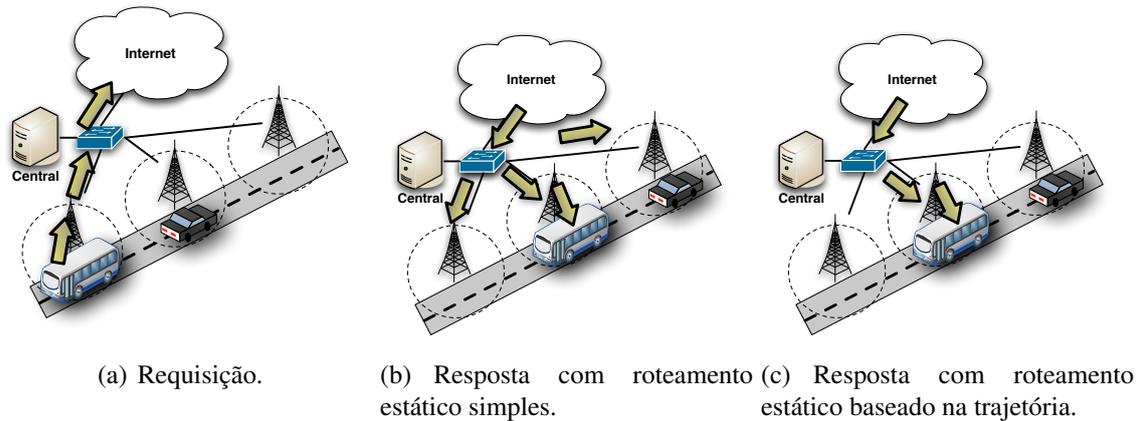


Figura 2. Entrega de mensagens com o roteamento baseado em trajetória: (a) um usuário móvel envia uma requisição à rede; (b) a resposta é enviada para todas as UAs caso o encaminhamento seja simplesmente estático; (c) a resposta é entregue à UA mais próxima do usuário móvel de acordo com a previsão baseada na trajetória conhecida.

mensagens apenas para as UAs mais próximas ao destino móvel, a troca de mensagens de controle, mesmo na rede DTN, pode ser reduzida. Assim, encontrar mais cedo a provável posição do destinatário evita replicações de mensagens na rede sem-fio. A desvantagem é a possibilidade de o veículo realizar uma mudança de trajetória não prevista, levando à perda de dados. Em caso de ônibus, esse comportamento é pouco provável.

Na arquitetura proposta, os veículos enviam informações de localização à Central toda vez que se conectam a uma nova UA usando uma mensagem DTN específica. Assumindo que a trajetória dos veículos é conhecida, após receber as mensagens de controle, a Central pode estimar sua futura localização. A trajetória pode ser predeterminada, em veículos tais como ônibus e trens ou informada por usuários cooperativos. O banco de dados de posicionamento mantido pela Central é permanentemente atualizado com a informação sobre as futuras UAs no caminho dos nós móveis. Portanto, a Central obtém no banco de dados a próxima UA ao qual um veículo irá se conectar para enviar uma mensagem que lhe é destinada. Assim, reduz-se o número de UAs encarregadas de encaminhar as mensagens. Para melhorar a confiabilidade, a Central poderia enviar a mensagem à UA mais provável e às UAs vizinhas. Assim, caso o veículo mudasse de rota, o mecanismo ainda teria chance de entregar a mensagem corretamente.

A Figura 2 ilustra o roteamento baseado em trajetória proposto. Na Figura 2(a), um usuário móvel envia uma requisição à rede. Já na Figura 2(b), a resposta é encaminhada utilizando o encaminhamento estático sem conhecimento da trajetória. Note que a Central desconhece a posição do destino e, por isso, encaminha a resposta para todas as UAs. A Figura 2(c) ilustra o efeito da proposta já que a resposta é encaminhada pela Central somente à UA mais próxima ao usuário móvel de acordo com a previsão da trajetória.

4. Implementação do Roteamento Híbrido

No cenário híbrido, é necessário configurar dois modos diferentes de roteamento nas UAs, o modo estático na interface de rede cabeada e o epidêmico na interface de rede sem-fio. Entretanto, a implementação de DTN utilizada,

IBR-DTN [Doering et al., 2008], permite apenas um modo de roteamento por nó da rede, independente do número de interfaces. Nesse caso, uma alternativa para contornar essa limitação deve ser desenvolvida. Na implementação realizada, as UAs foram configuradas com o roteamento epidêmico e regras de *firewall* foram adicionadas na interface cabeada, de maneira que ela se comporte como se estivesse no modo estático. Cada UA só possui, então, a Central como vizinho na rede cabeada.

Outra questão sobre a implementação das UAs atuando como ponto de interconexão entre a rede epidêmica e a rede estática é a mudança no identificador DTN do destinatário. Para forçar as UAs a se comportarem como pontes, é adicionada a informação do identificador do destinatário final dentro do *bundle* DTN. Essa estratégia se faz necessária já que a Central não é vizinha dos usuários móveis e, portanto, não possui entradas configuradas em sua tabela de encaminhamento. Assim, se a Central quiser se comunicar com um veículo, ela deve adicionar o identificador desse veículo como destino do *bundle* e então enviar à UA correspondente. A UA usa esse identificador para enviar a mensagem ao veículo correto.

4.1. Encaminhamento baseado em trajetória

O mecanismo baseado em trajetória é implementado via uma “aplicação de localização” que provê à Central informações sobre os veículos e suas posições. Consequentemente, o equipamento sem-fio dentro dos veículos se conecta a uma rede sem-fio usando o aplicativo de localização desenvolvido. Essa conexão é efetuada por um *script* que primeiro procura por identificadores de redes sem-fio (SSIDs) conhecidos e então se conecta àquela com a maior potência de sinal. Para fins de confiabilidade, testa-se a conectividade entre o veículo e a Central de tempos em tempos, se a conexão não for boa o suficiente, o *script* tenta se conectar a outra UA, reiniciando todo o procedimento. Assim que a conexão entre um veículo e a Central é estabelecida, o veículo cria uma mensagem de localização e a envia à Central. Esse procedimento usa a aplicação *dtnsend* disponível na implementação usada neste trabalho (IBR-DTN) [Doering et al., 2008]. O *dtnsend* é usado para enviar arquivos na rede DTN. A mensagem contém um arquivo escrito em XML, que pode ser visto na Lista 1.

Na Central, a aplicação efetua um laço infinito recebendo mensagens dos nós móveis que executam a aplicação de localização desenvolvida. A Central utiliza o *dtnrecv*, que é uma aplicação do IBR-DTN para receber arquivos enviados com o *dtnsend*. A mensagem recebida é analisada e a informação de posição é extraída. A aplicação usa o identificador do ônibus para procurar sua trajetória predeterminada. A partir da trajetória e do identificador da última UA que o ônibus esteve, a aplicação prevê as próximas UAs que o veículo passará. As informações obtidas sobre a atual e as futuras posições do ônibus são escritas em um arquivo nomeado de acordo com o identificador do veículo. Esses arquivos podem ser usados como entrada de outras aplicações que precisem da posição do veículo. Neste trabalho, o roteamento estático pode estar ciente da posição de um dado veículo pela leitura de arquivo de registros (*log*) correspondente.

Quando a Central envia uma mensagem a um veículo, ela a envia à última UA onde o veículo foi visto e às próximas UAs da trajetória. Neste artigo, experimentos foram realizados variando o número de UAs intermediárias, a fim de observar o impacto desse parâmetro na rede.

```

<LOCBUNDLE>
  <APPLICATIONID>
    LOCALIZATION
  </APPLICATIONID>
  <APPLICATIONHEAD>
    <TIME> Hora–minuto </TIME>
    <BID> Número aleatório </BID>
  </APPLICATIONHEAD>
  <APPLICATIONBODY>
    <VEHICLE> Identificador do veículo </VEHICLE>
    <BUSTOP> Identificador da UA </BUSTOP>
  </APPLICATIONBODY>
</LOCBUNDLE>

```

Lista 1. Formato da mensagem de localização.

5. Cenário de Testes

O cenário de testes consiste de um computador e seis roteadores sem-fio. O computador faz o papel da Central, enquanto os roteadores sem-fio fazem ou o papel das UAs ou dos equipamentos sem-fio dentro dos veículos. Os roteadores agindo como equipamentos sem-fio dos veículos também assumem o papel de clientes móveis.

O computador possui um processador Intel Pentium D de 3,20 GHz e 4 GB de memória RAM. O sistema operacional utilizado é o Debian Etch [Debian, 2012] e a implementação do protocolo DTN é a IBR-DTN [Doering et al., 2008]. O protocolo de roteamento padrão é o estático, o que requer configuração prévia de todas as UAs. As UAs são roteadores sem-fio D-Link DIR-320 com 32 MB de memória RAM e 4 MB de memória flash. Esses roteadores utilizam como sistema operacional o OpenWrt [OpenWrt, 2012]. O protocolo de roteamento é configurado de acordo com o tipo de interface de rede: interfaces de rede sem-fio são configuradas em modo epidêmico enquanto as interfaces de rede cabeada são configuradas em modo estático usando as regras de *firewall* como recurso disponível. Todas as UAs anunciam uma rede sem-fio para conexão dos veículos. Adicionalmente, as UAs podem armazenar *bundles* em seus *buffers* enquanto a conexão com o destinatário não for possível. Por isso, todos os roteadores possuem um dispositivo de armazenamento USB externo.

O cenário de rede utilizado pode ser visto na Figura 3. Existem cinco UAs no ambiente de testes, a Central e um roteador representando, ao mesmo tempo, o equipamento sem-fio dentro de um veículo e o usuário móvel. Sempre que necessário, um *script* que emula a movimentação do veículo é utilizado, conectando e desconectando o veículo das UAs como aconteceria com o veículo em um deslocamento real.

6. Resultados

Os testes realizados contemplam as seguintes métricas de desempenho: tempo de localização do veículo, número de replicações de mensagens, taxa de entrega de mensagens e tráfego na rede sem-fio. Para avaliar a queda da taxa de entrega imposta pela solução, os testes comparam a proposta com o protocolo de roteamento epidêmico, que é o melhor em termos de taxa de entrega e ainda é um dos poucos a disponibilizar uma implementação conhecida para uso em redes de testes. Uma vez que a abordagem de



Figura 3. Rede de testes utilizada nos experimentos.

localização depende de trajetórias predeterminadas, os testes foram conduzidos considerando o veículo como um ônibus universitário. Assim, assume-se as paradas de ônibus como o local mais adequado para o posicionamento das UAs. Consequentemente, uma avaliação preliminar foi realizada para medir o tempo médio que um ônibus permanece conectado com uma mesma UA. Foi avaliado o caso onde o ônibus não para e o caso em que ele para no ponto de ônibus para pegar passageiros. Ambas as avaliações foram conduzidas na própria universidade (Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ), para permitir resultados mais próximos da realidade.

De acordo com as medidas feitas, os ônibus permanecem conectados em média por 65 e 36 segundos, respectivamente, caso parem ou não para pegar passageiros. Ainda conforme testes realizados, as regiões de cobertura das UAs são de aproximadamente 200 metros na via. Além disso, o tempo de desconexão entre UAs consecutivas é de 90 segundos em média. Isso é calculado considerando que a distância entre as paradas de ônibus e a velocidade máxima permitida na via do campus são de 1 km e 40 km/h, respectivamente. Ao longo dos experimentos são comparadas a abordagem proposta e a abordagem puramente epidêmica.

6.1. Tempo de localização dos veículos

O cenário híbrido proposto requer mensagens de localização dos ônibus para a Central. Portanto, toda a comunicação entre essas duas entidades deve ser realizada em um tempo menor que o tempo mínimo de conexão com uma UA. Se esse requisito for garantido e a trajetória do ônibus seguir o esperado, a localização correta do ônibus pode ser assumida.

Neste teste, mediu-se o tempo necessário para todo o processo, desde a associação à rede sem-fio até a recepção da informação correspondente na Central. Para tal, foram criados dois *scripts*: um executado pelo roteador do ônibus e outro pela Central. O *script* do ônibus é responsável por conectá-lo às UAs, escrevendo a hora de inicialização do *script* em um arquivo e enviando a mensagem de localização para a Central. A Central aguarda a mensagem de localização e ao recebê-la, escreve a hora da chegada em um arquivo de registro próprio. Os relógios do roteador do ônibus e da Central estão sincronizados através de um único servidor NTP (*Network Time Protocol*). Embora seja utilizado

o sincronismo dos relógios na localização dos ônibus, pequenas diferenças são toleráveis, já que a escala de tempo é da ordem de segundos ou minutos dependendo do cenário.

O teste foi repetido dez vezes e os seus resultados estão na Tabela 1. A última coluna é a diferença entre a hora de recebimento da mensagem pela Central e a inicialização do *script* do ônibus. O resultado revela que o tempo médio necessário para este procedimento é de 15,6 segundos, com desvio padrão de 3,98 segundos. Como pode ser observado, o tempo necessário para que um ônibus se conecte a uma UA e a Central receba sua localização é menor que o pior tempo de permanência do ônibus conectado a uma UA, que é de 36 segundos. Assim, pelos testes realizados, pode-se assumir que a mensagem de localização é entregue e, conseqüentemente, os nós móveis podem ser localizados.

Tabela 1. Tempo necessário para a localização do veículo.

Identificador da mensagem	Inicialização do <i>script</i> no ônibus	Recepção na UA	Recepção na Central	Tempo total da localização (s)
1	13:45:58	13:46:08	13:46:11	13
2	13:46:50	13:47:01	13:47:05	15
3	13:47:42	13:47:53	13:48:00	18
4	13:48:34	13:48:45	13:48:47	13
5	13:49:26	13:49:37	13:49:41	15
6	13:50:18	13:50:29	13:50:31	13
7	13:51:10	13:51:21	13:51:25	15
8	13:52:02	13:52:13	13:52:17	15
9	13:52:54	13:53:05	13:53:20	26
10	13:53:46	13:53:57	13:53:59	13

6.2. Replicação das mensagens

No teste de replicação das mensagens, o roteador agindo como ônibus emula a movimentação entre as diferentes UAs. O período que o ônibus permanece conectado à UA é de 65 segundos, que é o tempo médio requerido para um ônibus pegar passageiros. Já o tempo de desconexão é de 90 segundos conforme discutido no início da Seção 6. No teste, o ônibus inicia seu movimento na UA 1 e percorre todas as UAs em ordem crescente de identificador. A Central envia uma mensagem diferente a cada 0,1 segundos para o ônibus durante 1 minuto. Como o tempo em que o ônibus permanece conectado à mesma UA neste teste é maior que o tempo de envio de mensagens pela Central, o ônibus permanece conectado à mesma UA durante este experimento.

A Tabela 2 expressa o percentual de mensagens recebidas por cada UA, considerando as mensagens enviadas pela Central, e as mensagens de localização apenas na abordagem proposta. Devido à replicação de mensagens, a quantidade total recebida pelas UAs pode passar de 100%. Na Tabela 2, observa-se que a abordagem proposta reduz em mais de quinze vezes o número de mensagens replicadas na rede cabeada em comparação com o cenário de roteamento epidêmico. Além disso, como o encaminhamento proposto usa a abordagem baseada na trajetória, as mensagens são encaminhadas apenas à última UA onde o ônibus esteve conectado e à próxima UA da trajetória do ônibus. Pode-se, então, inferir que o ônibus estava conectado à rede através da UA 3. O valor percentual maior que 100% ocorre, pois as mensagens de localização também são enviadas pelo encaminhamento proposto.

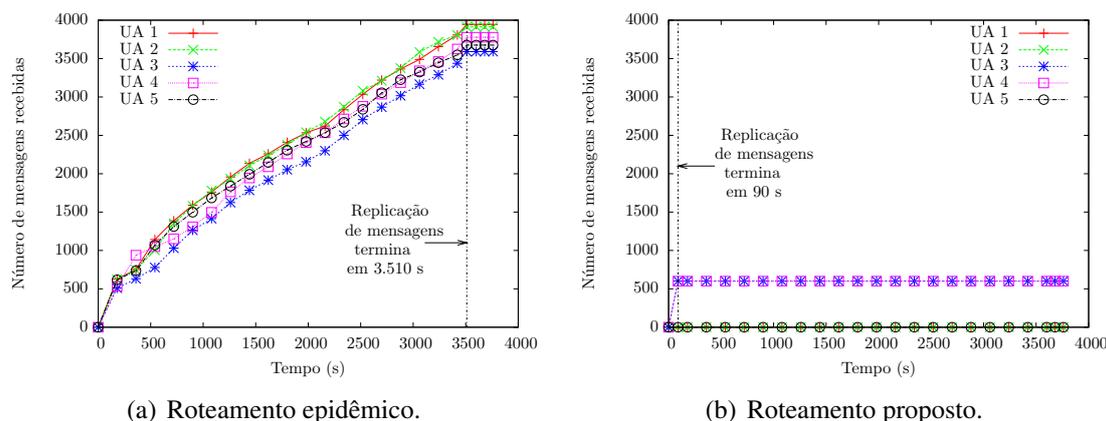


Figura 4. Replicação de mensagens na rede cabeada.

No roteamento epidêmico, as réplicas das mensagens são recebidas por todas as UAs. A considerável quantidade de réplicas ocorre, pois cada UA, tendo recebido a mensagem, a replica para todos os seus vizinhos, isto é para todas as outras UAs. Por isso, a vantagem de utilizar o roteamento proposto é proporcional ao número de UAs já que o número de réplicas de mensagens é constante no protocolo proposto, enquanto é crescente com o número de UAs no caso epidêmico.

Tabela 2. Replicação de mensagens nas UAs.

Identificador da UA	Roteamento proposto	Roteamento epidêmico
1	0%	657,3%
2	0%	652,3%
3	100,2%	598,5%
4	100%	629,7%
5	0%	612,7%
Total	200,2%	3150,5%

Durante o teste, todas as mensagens foram enviadas pela Central em um minuto. Entretanto, as abordagens de roteamento levam tempo adicional para terminar a replicação de mensagens na rede cabeada. Na abordagem proposta, o procedimento de replicação leva 90 segundos para entregar todas as mensagens às UAs selecionadas de acordo com o encaminhamento proposto baseado na trajetória, como visto na Figura 4(b). Em oposição, o roteamento epidêmico leva 58 minutos e 12 segundos para entregar todas as mensagens e suas réplicas para todas as outras UAs, como visto na Figura 4(a). Em ambas as figuras, o platô somente é alcançado quando a replicação de mensagens termina. Isso claramente mostra o impacto negativo do roteamento epidêmico nas redes cabeadas, que é evitado em nossa arquitetura híbrida.

6.3. Entrega de mensagens

No teste de entrega de mensagens, o ônibus circula pelas cinco UAs parando para pegar passageiros. Os testes foram realizados durante 24 horas e a Central envia 500 mensagens durante o experimento. Esse teste avalia a comunicação do ponto de vista do roteador do ônibus.

A Tabela 3 mostra os resultados do número de mensagens perdidas, do percentual de mensagens entregues ao roteador do ônibus, do número médio de réplicas de mensagens recebidas pelo roteador do ônibus e do maior número de réplicas recebidas pelo ônibus. Analisando os resultados, observa-se um compromisso da abordagem baseada na trajetória. O número médio de réplicas de mensagens entregues ao ônibus e o número de mensagens perdidas são maiores que o do roteamento epidêmico. Contudo, o número de réplicas é uma função do número de UAs usadas durante o procedimento de localização. Embora, a Central escolha apenas a UA atual e a próxima na trajetória do ônibus, isso pode ser ajustado, podendo variar desde apenas uma UA (p. ex. a UA atual) até todas as UAs em uma determinada área. Isso vai depender do nível de confiança desejado frente o número tolerado de réplicas.

Tabela 3. Estatísticas de entregas de mensagens.

Estatísticas	Roteamento epidêmico	Roteamento proposto
Número de mensagens perdidas	0,00	3,00
Taxa de entrega de mensagens	100,00%	99,60%
Número médio de réplicas recebidas	1,36	1,79
Número máximo de réplicas recebidas	2,00	2,00

6.4. Análise do tráfego na rede sem-fio

No teste de análise do tráfego na rede sem-fio, a quantidade de dados transferidos entre o ônibus e todas as UAs por onde o ônibus passou em seu percurso foi medida. Durante o experimento, a Central envia 160 mensagens igualmente distribuídas ao longo de duas horas. Tais mensagens são recebidas em 55 oportunidades de contato do ônibus com as UAs, das quais as seis primeiras e as seis últimas são usadas apenas para estimar o tráfego das mensagens de controle. Para uma análise mais completa, foi analisada também a taxa de entrega das mensagens. Assim, pretende-se identificar as causas de uma possível redução na taxa de entrega, seja ela devido à carga da rede ou ao efeito da aplicação de localização.

O ônibus mantém o mesmo padrão de movimentação do experimento anterior, ou seja, 65 segundos de conexão com as UAs e 90 segundos de desconexão entre UAs. Esse teste foi realizado para quatro diferentes configurações: a epidêmica e três possibilidades de configurações híbridas. A diferença entre as configurações híbridas é o número de UAs servindo como nós intermediários entre a Central e os destinatários móveis. Foram testadas as configurações nas quais a Central envia mensagens para apenas a última UA onde o ônibus foi encontrado (Configuração Híbrida 1UA); para a última e a próxima UA na trajetória do ônibus (Configuração Híbrida 2UA); e para a última e as duas próximas UAs na trajetória do ônibus (Configuração Híbrida 3UA). Espera-se que o aumento do número de UAs tenha como consequência um aumento do tráfego na rede sem-fio e um aumento da taxa de entrega.

A Tabela 4 apresenta, para cada cenário, a taxa de entrega e o número de mensagens perdidas, desconsideradas as réplicas. A replicação média de uma mensagem,

ou seja, o número médio de mensagens iguais que o ônibus recebe para cada mensagem entregue, e o máximo de réplicas recebidas de uma mesma mensagem são também apresentadas. A taxa de entrega é menor comparada a resultados anteriores (Tabela 3) pois os experimentos consideram um cenário móvel com maior carga.

A Tabela 4 mostra que a taxa de entrega na configuração Híbrida 1UA foi de 31,250% que é baixa já que as mensagens eram entregues apenas às UAs nas quais os ônibus estavam conectados. Isso significa que apenas as mensagens geradas pela Central no intervalo de tempo entre receber a mensagem de apresentação e a saída do ônibus do ponto podiam ser recebidas. Observa-se que a taxa de entrega da configuração Híbrida 3UA e da configuração epidêmica são próximas, demonstrando que a configuração proposta consegue aumentar a taxa de entrega com o aumento do número de UAs intermediárias. Além disso, pode-se concluir que com três UAs, já é possível obter uma taxa de entrega próxima a da configuração epidêmica. Vale ainda mencionar que o número de cópias recebidas pelo ônibus reflete o número de mensagens geradas na Central, no caso do cenário epidêmico; e o número de mensagens geradas nas UAs, no caso híbrido.

Tabela 4. Entrega de mensagens.

Cenário	Taxa de entrega	Número de mensagens perdidas	Replicação média de uma mensagem	Maior número de réplicas
Epidêmico	80,625%	31	1	1
Híbrido 1UA	31,250%	110	1	1
Híbrido 2UA	59,375%	65	1,484	2
Híbrido 3UA	80,000%	32	1,880	3

A Figura 5 apresenta a quantidade de dados transmitidos e recebidos pelo ônibus nas oportunidades de contato com as UAs. Os resultados mostram que o número de UAs intermediárias influencia diretamente no tráfego da rede sem-fio. Comparando a configuração epidêmica com as configurações híbridas, nota-se que a configuração epidêmica possui, em média, maior tráfego do que qualquer uma das configurações híbridas. Tal efeito é mais evidente nos dados recebidos pelo ônibus, já que os dados transmitidos pelo ônibus para as UAs são apenas de controle, conforme o experimento realizado. É importante perceber que a configuração Híbrida 3UA apresenta resultados de taxa de entrega próximos aos da epidêmica e, mesmo com maior replicação de mensagens, insere uma menor quantidade de dados na rede sem-fio. Isso é consequência da aplicação de localização que, além de reduzir a carga de dados na rede cabeada, ainda diminui a carga de controle na rede sem-fio. Tal carga de controle é usada pela rede DTN antes da troca de mensagens para evitar réplicas.

A Tabela 5 apresenta a média com o desvio padrão da carga transferida (dados mais controle). São apresentadas as médias ao longo das oportunidades de contato dos dados transmitidos e recebidos pelo ônibus, além do total. Novamente, verifica-se que a configuração epidêmica é a que insere maior quantidade de dados na rede sem-fio, seguida pela configuração Híbrida 3UA. Vale mencionar que o tráfego torna-se mais estável com a redução do número de UAs intermediárias.

Um resultado adicional pode ser verificado na Figura 5 durante os períodos de estabilização do sistema – seis primeiras e seis últimas oportunidades de contato. Nesses

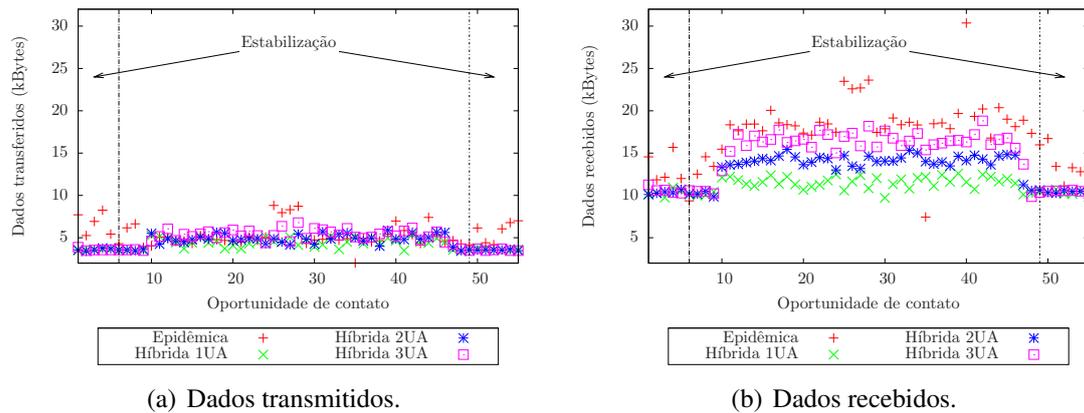


Figura 5. Dados transmitidos e recebidos pela interface sem-fio do ônibus.

Tabela 5. Carga de dados e controle transferidos na rede sem-fio.

Configuração	Dados transmitidos (kBytes)	Dados recebidos (kBytes)	Total (kBytes)
Epidêmica	$5,27 \pm 1,35$	$16,83 \pm 3,71$	$22,10 \pm 4,41$
Híbrida 1UA	$4,11 \pm 0,61$	$10,91 \pm 0,83$	$15,03 \pm 1,40$
Híbrida 2UA	$4,41 \pm 0,75$	$12,65 \pm 1,81$	$17,05 \pm 2,51$
Híbrida 3UA	$4,71 \pm 0,95$	$14,23 \pm 2,85$	$18,94 \pm 3,76$

períodos, todo o tráfego na rede sem-fio é devido aos processos de controle. No cenário epidêmico, onde todas as UAs e a Central se tornam vizinhas indiretas do ônibus, ele é resultante da troca periódica de informações de vizinhança. Todavia, nas configurações híbridas, ele é resultante tanto da troca periódica de informações de vizinhança quanto do envio das mensagens de localização. Como somente a Central é vizinha indireta do ônibus nos casos híbridos, há uma redução da carga da informação de vizinhança. Nota-se nesses períodos uma maior sobrecarga inserida pelo cenário epidêmico, o que confirma os resultados anteriores. Enquanto todos os cenários híbridos possuem taxa de controle entre 12 e 15 kBytes, o cenário epidêmico possui uma taxa que varia entre 12 e 24 kBytes.

De forma geral, pode-se concluir que o cenário proposto pode diminuir o tráfego de controle da rede sem-fio e ainda alcançar taxas de entrega similares à configuração epidêmica. Tanto a taxa de entrega quanto a carga de dados são dependentes das configurações realizadas, como o número de UAs intermediárias utilizadas. Acredita-se que o desempenho da proposta é ainda mais evidente em cenários em maior escala onde o número de UAs é maior que cinco.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho propôs um protocolo de roteamento para cenários híbridos que combinam redes sem-fio veiculares com conexão intermitente e redes infraestruturadas com acesso à Internet através de múltiplos pontos de interconexão (*gateways*). O protocolo proposto combina a utilização de roteamento estático na parte cabeada e epidêmico na parte sem-fio. Como as redes DTN não foram projetadas para redes cabeadas, um mecanismo baseado em trajetória foi desenvolvido para evitar replicação de mensagens na rede cabeada e ainda reduzir a carga de controle da rede sem-fio. Os resultados experimentais

mostraram que o mecanismo proposto evita, de fato, a replicação de mensagens na rede cabeada e ainda oferece mobilidade transparente para os usuários sem-fio. Ainda, a proposta se mostrou capaz de reduzir a carga de controle da rede sem-fio, podendo manter a mesma taxa de entrega da configuração epidêmica.

Como trabalhos futuros, planeja-se propor um mecanismo para mudar dinamicamente a trajetória esperada dos veículos e ainda estender os experimentos realizados para uma rede de testes maior.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo CNPq, CAPES, CTIC/RNP e FAPERJ.

Referências

- Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D. e Levine, B. N. (2006). MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. Em *IEEE INFOCOM*, p. 1–11.
- Cheng, P.-C., Lee, K. C., Gerla, M. e Härri, J. (2010). GeoDTN+Nav: Geographic DTN routing with navigator prediction for urban vehicular environments. *Mobile Networks and Applications*, 15:61–82.
- Debian (2012). The universal operating system. <http://www.debian.org/>.
- Doering, M., Lahde, S., Morgenroth, J. e Wolf, L. (2008). IBR-DTN: an efficient implementation for embedded systems. Em *ACM CHANTS*, p. 117–120.
- Han, B., Hui, P., Kumar, V. S. A., Marathe, M. V., Pei, G. e Srinivasan, A. (2010). Cellular traffic offloading through opportunistic communications: a case study. Em *ACM CHANTS*, p. 31–38.
- OpenWrt (2012). Openwrt: Wireless freedom. <https://openwrt.org>.
- Ott, J. e Kutscher, D. (2005). Exploiting regular hot-spots for drive-thru Internet. Em *Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS)*, p. 218–229.
- Saucez, D., Iannone, L. e Bonaventure, O. (2009). OpenLISP: An open source implementation of the Locator/ID separation protocol. Em *ACM SIGCOMM Demos Session*, p. 1–2.
- Scott, K. e Burleigh, S. (2007). Bundle protocol specifications. RFC 5050.
- Spyropoulos, T., Psounis, K. e Raghavendra, C. S. (2008a). Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(1):77–90.
- Spyropoulos, T., Psounis, K. e Raghavendra, C. S. (2008b). Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(1):63–76.
- Weissberger, A. (2012). Strong growth in WiFi LAN equipment and WiFi phone sales as total market nears \$1B! <http://community.comsoc.org/blogs/alanweissberger/strong-growth-wifi-lan-equipment-and-wifi-phone-sales-total-market-nears-1b>.