

Protocolos de Encaminhamento para Redes Veiculares com Ligações Intermitentes

Vasco N. G. J. Soares^{1,2}, João A. Dias¹, João N. Isento¹ e Joel J. P. C. Rodrigues¹

¹Instituto de Telecomunicações, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

²Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal

vasco.g.soares@ieee.org, joao.dias@it.ubi.pt, joao.isento@it.ubi.pt, joeljr@ieee.org

Resumo— As redes veiculares são constituídas por automóveis ou outros meios de transporte equipados com dispositivos de comunicação sem fios, que comunicam diretamente entre si ou com equipamentos de infraestrutura localizados junto às estradas. Nestas redes, o encaminhamento de dados é considerado um grande desafio tendo em conta as topologias de rede altamente dinâmicas, densidade variável, tempos de contacto reduzidos, ligações intermitentes e frequentes partições. Este artigo pretende apresentar uma análise comparativa do desempenho de protocolos de encaminhamento baseados no paradigma de “armazenamento, transporte e envio de agregados” (do inglês, *store-carry-and-forward*) em redes veiculares com ligações intermitentes (do inglês, *vehicular delay-tolerant networks* - VDTNs). Os protocolos considerados são o First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait, PRoPHET, GeOpps e GeoSpray. O estudo é conduzido por simulação e analisa o comportamento destes protocolos com base nas métricas de desempenho: número de transmissões de agregados iniciadas, número de agregados descartados, probabilidade de entrega de agregados, tempo médio do atraso na entrega de agregados, número médio de saltos e sobrecarga de recursos.

Palavras-chave — *Redes Veiculares com Ligações Intermitentes; Protocolos de Encaminhamento; Paradigma “Armazenamento, Transporte e Envio de Agregados”; Avaliação do Desempenho.*

I. INTRODUÇÃO

As redes veiculares [1-3] têm vindo a despertar um interesse crescente devido à sua potencial utilização numa ampla gama de aplicações com impacto na vida quotidiana [1, 4]. Entre inúmeras aplicações destacam-se a segurança rodoviária (p. ex. evitar acidentes), a eficiência dos sistemas de transporte (p. ex. optimização de fluxos de tráfego), a recolha e transmissão de dados de monitorização (p. ex. medições de poluição), as aplicações comerciais (p. ex. divulgação de informações turísticas e de lazer), e as aplicações de entretenimento (p. ex. partilha de conteúdos de multimédia). Estas redes poderão ter um papel essencial para assegurar a conectividade em regiões remotas ou comunidades rurais em países subdesenvolvidos que não dispõem de qualquer tipo de meio de comunicação convencional de acesso à Internet, ou em cenários de catástrofe natural quando as infraestruturas de rede tradicionais são destruídas ou muito afectadas.

No entanto, para que estas aplicações se tornem realidade, é necessário encontrar soluções para uma série de problemas e

desafios técnicos que caracterizam estas redes. Alguns desses desafios são comuns a outras redes sem fios, enquanto outros são colocados pelas características particulares das redes veiculares. De acordo com [2, 3, 5-7], a maioria dos problemas é causada pela mobilidade e a velocidade dos veículos, a qual é responsável por uma topologia de rede altamente dinâmica e tempos de contacto entre nós de duração reduzida.

Acrescentam-se ainda as limitações no alcance da transmissão, os problemas de propagação causados por obstáculos (p. ex. edifícios, túneis, terreno e vegetação) e as interferências. Em conjunto, estas questões tornam estas redes susceptíveis a conectividade intermitente e divisão/partição da rede, resultando na impossibilidade frequente de estabelecer uma ligação extremo-a-extremo entre a origem e o destino da comunicação de dados. Além disto, nestas redes, a densidade de nós pode ser altamente variável. Por exemplo, uma rede veicular pode ser classificada como densa num engarrafamento, enquanto que no tráfego suburbano pode ser esparsa, ou até mesmo extremamente esparsa em zonas rurais/remotas.

Pelo acima exposto, torna-se claro que a disseminação de dados numa rede veicular é um problema complexo. A natureza volátil e imprevisível destas redes espontâneas e auto-organizadas aumenta a complexidade inerente ao desenvolvimento de protocolos de encaminhamentos que optimizem o desempenho destas redes.

Neste trabalho, procede-se a uma análise sobre a utilização de protocolos de encaminhamento baseados no paradigma de “armazenamento, transporte e envio de agregados” (do inglês, *store-carry-and-forward* - SCF), aplicados a cenários de redes veiculares com ligações intermitentes (do inglês, *vehicular delay-tolerant networks* - VDTNs).

O artigo está estruturado da forma descrita em seguida. Na Secção II apresentam-se os protocolos de encaminhamento (do tipo SCF) de referência propostos na literatura e em estudo. A comparação do desempenho destes protocolos é apresentada na Secção III. A Secção IV conclui o artigo e apresenta o trabalho futuro.

II. TRABALHO RELACIONADO

A maioria dos estudos publicados sobre protocolos de

encaminhamento para redes veiculares considera cenários de autoestradas e ruas citadinas, caracterizados por uma elevada densidade de nós ou até mesmo redes totalmente conectadas. Os protocolos de encaminhamento propostos na literatura para estas redes, designadas de redes veiculares ad-hoc (do inglês, *vehicular ad-hoc networks* - VANETs) [1-4, 8-10], assumem a existência de uma ligação extremo-a-extremo entre o emissor e o receptor de dados [11, 12]. Pelo que apresentam como grande limitação a incapacidade de lidar com ligações intermitentes, com a frequente desconexão da rede (partições da rede) e atrasos longos ou variáveis [2, 3, 13-15]. Tais situações são muito comuns em cenários urbanos ou rurais caracterizados por densidades de nós moderadas ou reduzidas, e pouca ou nenhuma infraestrutura de rede fixa disponível.

A arquitetura de rede proposta para redes com ligações intermitentes (do inglês, *delay/disruption-tolerant networks* - DTNs) [16], e inicialmente aplicada às redes interplanetárias, foi entretanto considerada uma solução promissora para resolver estes problemas. A arquitetura DTN propõe que o encaminhamento das unidades protocolares de dados, designadas de agregados (do inglês, *bundles*) [17], seja realizado de acordo com um paradigma de “armazenamento, transporte e envio de agregados”, assente na utilização de armazenamento persistente, que tira partido de contactos oportunisticos e de comunicação assíncrona. A ideia subjacente a este paradigma é a de permitir que um nó armazene os agregados em memória persistente (p. ex. disco rígido) e os transporte até encontrar o nó de destino, ou um nó intermédio que poderá vir a encontrar o nó de destino num futuro próximo. Sempre que ocorre uma oportunidade de contacto, cada nó toma as suas decisões de encaminhamento de forma independente.

A utilização deste paradigma permite que o tráfego de dados de uma variedade de aplicações veiculares tolerantes ao atraso e à perda de alguns dados, seja encaminhado ao longo do tempo, explorando-se o movimento físico dos veículos e os contactos oportunisticos estabelecidos entre estes e com outros nós da rede. Um exemplo de uma arquitetura proposta para comunicações veiculares em redes esparsas/particionadas e oportunisticas, que segue este paradigma, foi apresentado em [18]. Este tipo de redes são designadas de redes veiculares com ligações intermitentes (do inglês, *vehicular delay-tolerant networks* - VDTN).

Algumas das características que diferenciam os protocolos de encaminhamento para redes do tipo DTN, tais como as VDTNs, são se assumem que não existe qualquer tipo de conhecimento, ou se consideram e eventualmente combinam informação sobre dados de histórico (p. ex. encontros recentes, tempo de contacto, frequência de contacto), localização (p. ex. informação de localização do passado, presente, ou futuro), ou ainda padrões de mobilidade.

Os protocolos de encaminhamento são também habitualmente classificados em duas classes: cópia-única e cópia-múltipla. Os protocolos com estratégia baseada em cópia-única permitem que apenas uma única cópia de um

agregado esteja presente na rede num determinado instante de tempo. Pelo contrário, se a estratégia é baseada em cópia-múltipla, então os protocolos permitem a replicação de um mesmo agregado para vários nós. Com esta abordagem tenta-se aumentar a probabilidade de entrega e minimizar o atraso na entrega. Contudo, tal estratégia pode causar sobrecarga na utilização de recursos de largura de banda e de armazenamento nos nós de rede.

Apresentam-se de seguida alguns dos protocolos de encaminhamento mais populares para redes DTN, que podem ser utilizados em redes veiculares do tipo VDTN.

Direct Delivery [19] e First Contact [20], são exemplos de dois protocolos de encaminhamento com estratégia de cópia-única, que não utilizam qualquer tipo de informação sobre a rede. No protocolo Direct Delivery, o nó transporta um agregado até encontrar o nó de destino e entregar o mesmo. Este protocolo provoca sobrecarga (*overhead*) mínima, porém pode implicar atrasos de entrega muito elevados. No protocolo de encaminhamento First Contact, os nós comutam/despacham os agregados que transportam para o primeiro nó que encontram. Tal resulta numa procura aleatória pelo nó de destino. O princípio de funcionamento destes protocolos encontra-se ilustrado nas Figuras 1 e 2 respectivamente.

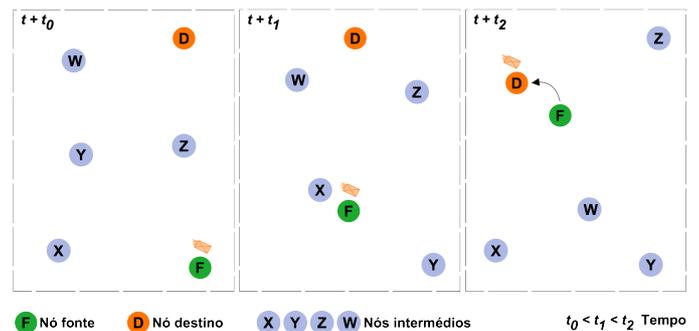


Fig. 1. Princípio de funcionamento do protocolo Direct Delivery.

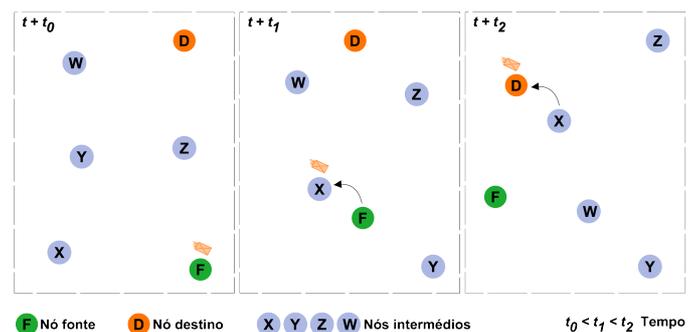


Fig. 2. Princípio de funcionamento do protocolo First Contact.

O protocolo Epidemic [21] baseia-se num esquema de “inundação” (*flooding*) puro, representado na Figura 3. Ou seja, os agregados são replicados para todos os nós encontrados na rede. Intuitivamente, o *flooding* assegura a entrega dos agregados ao nó de destino no menor tempo possível, se não existirem limitações de recursos (p. ex.

largura de banda e armazenamento). Contudo, tal abordagem representa um consumo excessivo de recursos e pode degradar severamente o desempenho da rede.

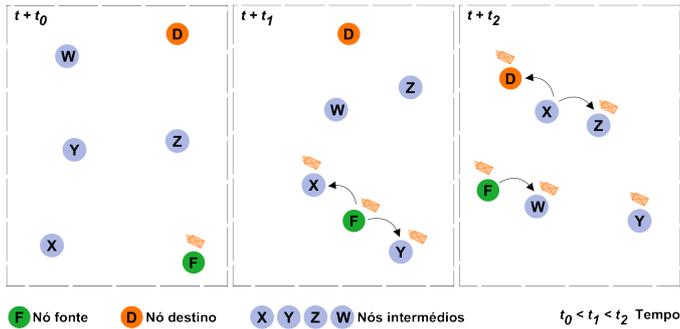
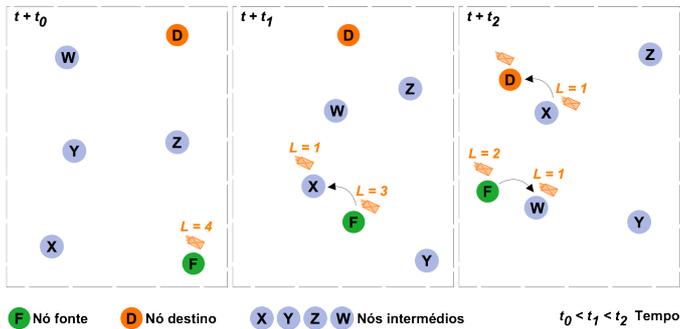


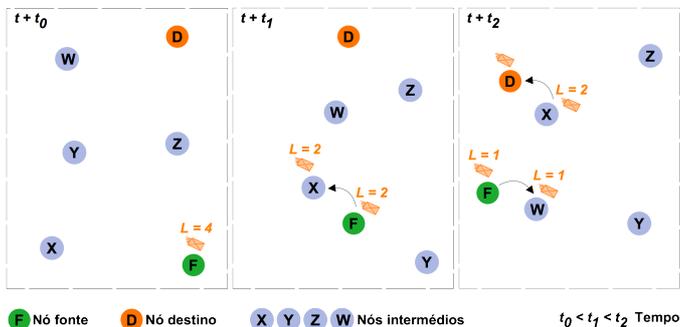
Fig. 3. Princípio de funcionamento do protocolo Epidemic.

O protocolo Spray and Wait [22] tenta controlar o *flooding* limitando o número máximo de cópias criadas por agregado. Este protocolo inicialmente distribui um número de cópias (L) de um agregado para nós intermédios e depois espera até que um destes nós encontre o nó de destino. A distribuição inicial das cópias pode ser realizada de acordo com uma de duas estratégias: “normal” ou “binária”. Na estratégia “normal”, ilustrada na Figura 4, o nó fonte transmite uma das cópias do agregado para cada nó encontrado. Na estratégia “binária”, representada na Figura 5, metade das cópias do agregado são enviadas para cada nó encontrado.



L Número de cópias do agregado

Fig. 4. Princípio de funcionamento do protocolo Spray and Wait - Normal.



L Número de cópias do agregado

Fig. 5. Princípio de funcionamento do protocolo Spray and Wait - Binário.

O protocolo PRoPHET [23] utiliza informação relativa ao histórico de contactos entre nós e da transitividade, representada na Figura 6. O histórico de contactos entre nós define $P_{(a,b)}$ como a probabilidade de dois nós, a e b , se encontrarem, e é calculada de acordo com a equação (1), onde P_{init} é uma constante de inicialização.

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)_{old}} + (1 - P_{(a,b)_{old}}) \times P_{init} \quad , \quad P_{init} \in [0,1] \quad (1)$$

Esta probabilidade ($P_{(a,b)}$), designada de previsibilidade de entrega, aumenta sempre que a e b se encontram. Se estes nós não se encontram frequentemente, então $P_{(a,b)}$ diminui à medida que o tempo decorre. Para esse efeito utiliza-se a equação (2), onde γ é a constante de envelhecimento e k o número de unidades de tempo que passaram desde a última vez que a métrica foi atualizada.

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)_{old}} \times \gamma^k \quad , \quad \gamma \in [0,1] \quad (2)$$

A previsibilidade de entrega tem uma propriedade transitiva $P_{(a,c)}$, que é baseada na observação de que se um nó a encontra frequentemente um nó b , e o nó b encontra frequentemente um nó c , então o nó c provavelmente é um bom nó para encaminhar agregados destinados ao nó a . A transitividade é calculada de acordo com a equação (3), onde β é uma constante que determina o impacto da transitividade no cálculo da previsibilidade de entrega.

$$P_{(a,c)} = P_{(a,c)_{old}} + (1 - P_{(a,c)_{old}}) \times P_{(a,b)} \times P_{(b,c)} \times \beta \quad , \quad \beta \in [0,1] \quad (3)$$

A métrica de previsibilidade de entrega é atualizada em cada contacto entre nós, e é utilizada para tomar decisões de encaminhamento. Um nó a apenas replica um agregado para um nó b encontrado se a previsibilidade de entrega for superior em b . Tal abordagem visa tentar limitar a replicação excessiva de agregados.

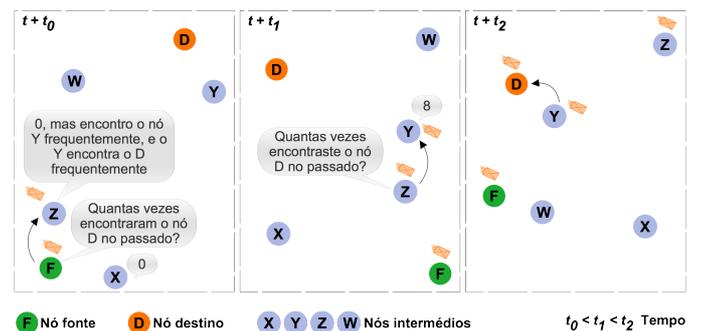


Fig. 6. Princípio de funcionamento do histórico de contactos entre nós e da propriedade de transitividade do protocolo PRoPHET.

Os protocolos de encaminhamento geográficos são de particular interesse para as redes veiculares. Estes protocolos

utilizam informação de localização obtida através de dispositivos de posicionamento, tais como GPS (do inglês, *global positioning system*), e outros parâmetros de mobilidade, para auxiliar na tomada de decisões de encaminhamento.

O Geographical Opportunistic Routing (GeOpps) [24] é um exemplo de um protocolo de encaminhamento geográfico popular que apresenta uma estratégia de cópia-única. Este protocolo utiliza informação obtida dos sistemas de navegação disponíveis nos veículos, para determinar que veículos eventualmente se movimentarão até um ponto mais próximo, ou mais cedo, do nó de destino de um agregado. Esta métrica, designada de tempo mínimo estimado de entrega (METD), é utilizada aquando de um contacto para determinar qual veículo deve ficar na posse de um determinado agregado, por aumentar a probabilidade de entrega do mesmo.

A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento deste protocolo, descrito de seguida. O sistema de navegação do nó F é utilizado para calcular o valor do METD. Para tal é utilizada a informação sobre a posição geográfica, a velocidade e trajetória/rota do nó F , assumindo que este é um veículo. Assumindo que a posição geográfica do nó terminal de destino D (do agregado) é conhecida, então é possível determinar a menor distância de D ao ponto mais próximo no trajeto/rota de F , designado de NP_F . Com base nesta informação, o sistema de navegação permite estimar o tempo de chegada (ETA) de F ao ponto NP_F , e estimar também o tempo necessário para ir de NP_F a D . A soma destes valores de tempo, representada na equação (4), corresponde ao valor do METD.

$$METD = ETA \text{ a } NP_F + ETA \text{ de } NP_F \text{ a } D \quad (4)$$

No exemplo ilustrado nesta figura, os veículos F e X encontram-se no ponto P . O cálculo do NP para F e X , com base trajetória/rota destes nós, permite concluir que o METD do X é inferior ao de F . Tal acontece porque o tempo requerido para ir do ponto P a NP_X e depois até D é inferior ao tempo necessário para ir do ponto P até NP_F e depois até D . Pelo que, F deve transmitir o agregado para X .



Fig. 7. Princípio de funcionamento do protocolo GeOpps.

O GeoSpray [25] é também um protocolo de encaminhamento geográfico que foi proposto recentemente. Este protocolo combina uma abordagem híbrida entre os esquemas de cópia-múltipla e cópia-única. Inicialmente aplica um esquema de cópia-múltipla de estratégia binária, que tem por objectivo disseminar um conjunto limitado de cópias de um mesmo agregado, para diferentes nós intermédios que se aproximarão mais ou chegarão mais rapidamente ao nó de destino. Exploram-se assim caminhos alternativos, escolhendo os nós intermédios com base na métrica de encaminhamento METD. Uma vez distribuídas estas cópias, o protocolo passa a utilizar um esquema de cópia-única, que tira partido de oportunidades de contacto adicionais. Desta forma, é permitido aos nós intermédios na posse de uma cópia do agregado que a despachem/comutem para outro nó encontrado na rede que tenha uma melhor métrica de encaminhamento METD. Por forma a melhorar a utilização de recursos (p. ex. largura de banda, espaço de armazenamento, energia), este protocolo possui um mecanismo designado de recibos ativos que é responsável pela eliminação das cópias dos agregados entregues com sucesso mas que permanecem armazenadas nos nós intermédios da rede.

III. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Nesta secção apresenta-se uma análise comparativa do desempenho dos protocolos de encaminhamento, descritos na secção anterior, em redes VDTN. O desempenho é comparado através de um estudo de simulação realizado utilizando a ferramenta VDTNsim [26] que é baseada no simulador Opportunistic Network Environment (ONE) [27].

O objectivo é perceber qual o impacto do número de nós móveis (veículos) no desempenho dos protocolos de encaminhamento. Para tal, foram consideradas seis métricas de desempenho neste estudo. O número de transmissões iniciadas de agregados é definido como o número de transmissões iniciadas entre nós. O número de agregados descartados é definido como o número de agregados que foram descartados dos *buffers* dos nós devido aos *buffers* estarem sobrecarregados ou por o tempo de vida dos agregados ter expirado. A probabilidade de entrega de agregados é definida como a razão entre o número de agregados únicos entregues e o número de agregados únicos criados. O tempo médio do atraso na entrega de agregados é definido como o tempo médio entre a criação dos agregados e a sua entrega. O número de saltos médio é definido como o número médio de saltos entre o nó fonte e o nó destino dos agregados. Finalmente, a sobrecarga de recursos é definida como o número de transferências que é necessário realizar (entre nós) para entregar os agregados.

Nas próximas duas subsecções serão descritos os cenários de simulação avaliados e a correspondente análise de resultados.

A. Cenários de Simulação

O cenário de rede é baseado num modelo do mapa de parte da cidade de Helsínquia - Finlândia, apresentado na Figura 8. Dez nós terminais e cinco nós fixos de *relay* [18, 28] foram colocados nas posições assinaladas no mapa. Cada um destes nós tem um *buffer* de tamanho 50 MB.

Durante um período de tempo de 6 horas simuladas (p. ex. das 8:00 às 14:00), 50, 100 ou 200 veículos movem-se ao longo das estradas, entre posições aleatórias, com uma velocidade média de 50 km/h, e com tempos de pausa aleatórios uniformemente distribuídos entre 5 e 15 minutos. Estes nós móveis têm um *buffer* de tamanho 12.5 MB.

Os agregados são originados pelos nós móveis e destinados a nós terminais aleatórios. São gerados aleatoriamente no intervalo de tempo uniformemente distribuído [55, 65] segundos. Têm um tempo de vida de 90 minutos e tamanhos aleatórios uniformemente distribuídos num de 3 intervalos [25 KB, 100 KB], [250 KB, 500 KB] e [750 KB, 1 MB] (bytes), que representam tráfego de diferentes aplicações.

De acordo com o indicado em [29], considera-se que os nós da rede comunicam entre si a uma taxa de transmissão de 4.5 Mbps e assume-se um alcance de 30 m. Nos três cenários simulados, utilizam-se os parâmetros por omissão definidos para o protocolo PРоPHET [23]. De acordo com [30], o parâmetro de número de cópias dos protocolos Spray and Wait e GeoSpray é configurado como 15% do número de nós móveis em cada um dos cenários.

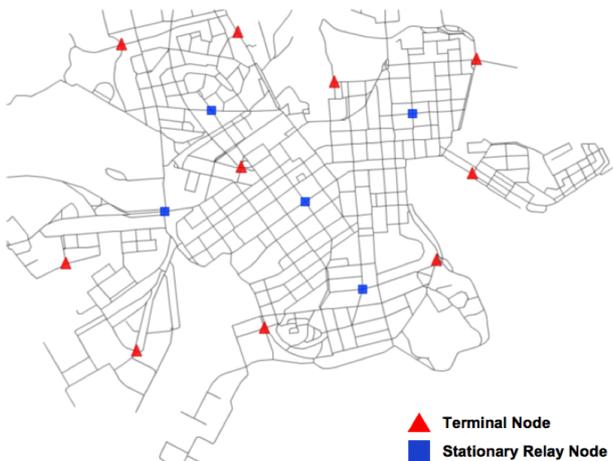


Fig. 8. Modelo do mapa de parte da cidade de Helsínquia - Finlândia, com as posições dos nós terminais e dos nós fixos de *relay* (área de 4500×3400 m).

Para cada um dos três cenários considerados, com diferentes densidades de nós móveis, foram geradas aleatoriamente 30 simulações, as quais foram aplicadas a todos os protocolos de encaminhamento. Os valores apresentados na próxima subsecção correspondem à média aritmética dos resultados das 30 simulações de cada protocolo em cada cenário. O valor do desvio padrão é desprezável e por esse motivo não é representado nos gráficos.

B. Análise dos Resultados

A comparação do desempenho dos protocolos de encaminhamento é iniciada com a análise do número de transmissões iniciadas de agregados. Na Figura 9 pode observar-se que o aumento da densidade dos nós móveis leva a um acréscimo do número de transmissões de agregados, dado que aumenta o número de oportunidades de contacto. Esta conclusão aplica-se a todos os protocolos de encaminhamento com exceção do Direct Delivery. No caso particular deste protocolo, os nós móveis (fontes de tráfego) apenas transmitirão os agregados originados em si para os nós terminais de destino, pelo que o incremento do número de nós móveis não implica um aumento do número de transmissões, pois estes nós não trocarão agregados entre si. O mau desempenho do First Contact deve-se à sua abordagem de procura aleatória assente numa estratégia de cópia-única, que resulta em valores elevados de números de transmissões iniciadas, nos três cenários considerados.

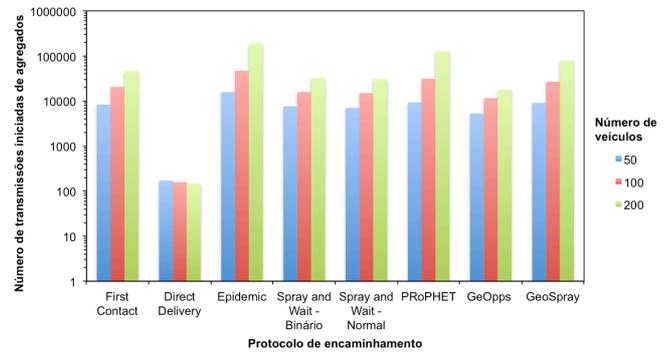


Fig. 9. Número de transmissões iniciadas de agregados em cenários com 50, 100 ou 200 veículos, para os protocolos de encaminhamento First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PРоPHET, GeoOpps e GeoSpray.

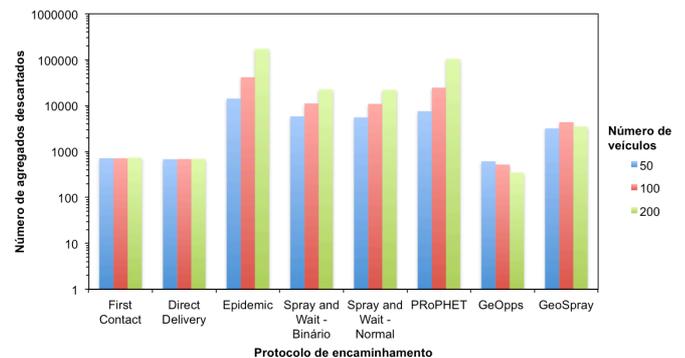


Fig. 10. Número de agregados descartados em cenários com 50, 100 ou 200 veículos, para os protocolos de encaminhamento First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PРоPHET, GeoOpps e GeoSpray.

Uma conclusão interessante que se pode retirar da análise das Figuras 9 e 10 é que os protocolos que utilizam uma estratégia baseada em cópia-múltipla contribuem efetivamente para o aumento significativo do número de transmissões

registadas, quando comparados com os de cópia-única, com consequências óbvias no consumo de recursos tais como armazenamento e largura de banda. Na Figura 10, pode observar-se, de facto, que estratégias de cópia-múltipla resultam no descarte de números elevados de agregados devido à ocorrência de sobrecarga dos *buffers* disponíveis nos nós.

Como seria de esperar, o protocolo com pior desempenho em ambas as métricas avaliadas nestas figuras é o Epidemic devido à sua abordagem de *flooding* puro. Merece especial atenção o comportamento do protocolo GeoSpray, que embora por exemplo despolete um número de transmissões ligeiramente superior ao de ambas as variantes do Spray and Wait (Figura 9), apresenta um número de agregados descartados muito inferior (Figura 10). A razão para tal prende-se com o mecanismo de recibos ativos do GeoSpray, que elimina as cópias de agregados entregues na rede que permanecem armazenadas nos nós intermédios da rede, contribuindo para a optimização da utilização dos recursos. Tanto o First Contact como o Direct Delivery apresentam um número de agregados descartados muito reduzido, dado o baixo volume de tráfego de dados considerado, sendo os agregados descartados maioritariamente porque o seu tempo de vida expira e não devido à ocorrência de sobrecarga dos *buffers*.

Os valores registados para a métrica de desempenho de probabilidade de entrega de agregados são apresentados na Figura 11. Como expectável, o aumento do número de nós móveis contribui para uma melhoria da probabilidade de entrega de agregados, para todos os protocolos excepto o First Contact e o Direct Delivery. As abordagens simplistas destes protocolos não tiram partido das oportunidades de contacto adicionais, sendo responsáveis pelo seu mau desempenho.

A análise desta figura permite concluir a importância da informação de localização geográfica para auxiliar na tomada de decisões de encaminhamento. O GeoOpps, mesmo sendo um protocolo geográfico com uma estratégia de cópia-única, apresenta um desempenho superior ao do Epidemic e do PRoPHET no cenário de 200 veículos. Por sua vez, o GeoSpray com a uma abordagem híbrida de cópia-múltipla e cópia-única auxiliada pela tomada de decisões com base em informação geográfica, evidencia-se de entre todos os protocolos avaliados, apresentando um acréscimo muito significativo da probabilidade de entrega nos três cenários estudados.

Também se observa que o protocolo PRoPHET embora controle o *flooding* puro (Figuras 9 e 10) utilizando informação relativa ao histórico de contactos entre nós e da transitividade, apresenta um desempenho inferior ao do protocolo Epidemic (Figura 11) em termos de probabilidade de entrega.

Relativamente ao tempo médio do atraso na entrega de agregados, mostrado na Figura 12, pode concluir-se que para os protocolos de encaminhamento Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray, o aumento da

densidade de nós móveis resulta num decréscimo relevante desta métrica. Ou seja, nestes protocolos, para o mesmo volume de tráfego de dados, a existência de um maior número de veículos resulta na melhoria da probabilidade de entrega e simultaneamente na diminuição do tempo de entrega (Figuras 11 e 12).

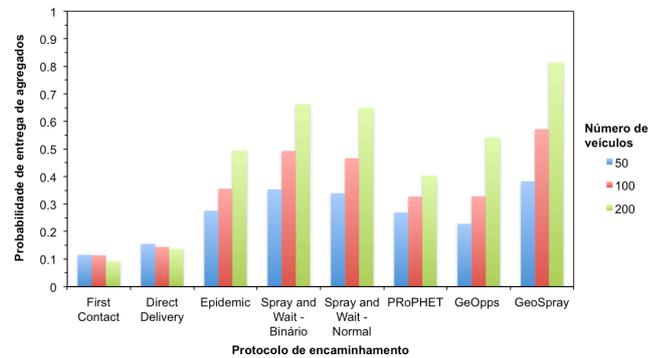


Fig. 11. Probabilidade de entrega de agregados em cenários com 50, 100 ou 200 veículos, para os protocolos de encaminhamento First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray.

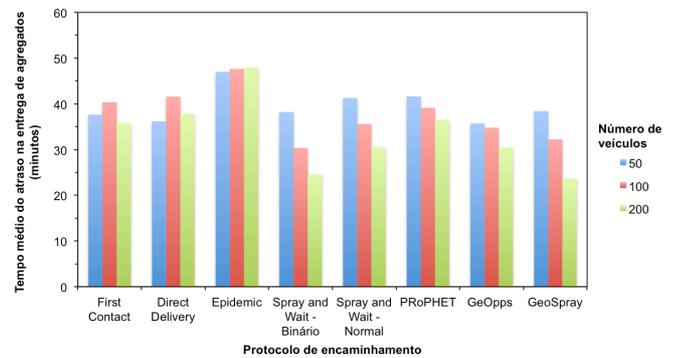


Fig. 12. Tempo médio do atraso na entrega de agregados em cenários com 50, 100 ou 200 veículos, para os protocolos de encaminhamento First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray.

A análise da Figura 13 revela que, como esperado, para os protocolos Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray, o incremento no número de nós móveis resulta no aumento do número médio de saltos entre o nó fonte e o nó destino. A comparação dos resultados obtidos para os dois protocolos geográficos, permite concluir que pelo facto de o GeoSpray permitir a existência de várias cópias de um mesmo agregado (explorando caminhos alternativos), em média requer um número significativamente menor de saltos para entregar os agregados do que o GeoOpps.

Os resultados observados para o Direct Delivery e o First Contact seriam previsíveis. No Direct Delivery os nós móveis apenas entregam o agregado ao nó terminal de destino, portanto efetuando um único salto. No First Contact as transmissões aleatórias entre nós à procura do nó de destino levam a que este protocolo apresente os piores resultados nesta

métrica de desempenho.

A última métrica de desempenho considerada neste estudo é a sobrecarga de recursos. Esta métrica avalia a eficiência de utilização da largura de banda dos protocolos de encaminhamento, uma vez que mede o número de transferências que é necessário realizar para entregar os agregados. Os resultados apresentados na Figura 14 comprovam que o protocolo Direct Delivery não cria qualquer sobrecarga de recursos por entregar os agregados apenas ao nó de destino. Fica também demonstrada a completa ineficiência do First Contact.

De uma forma geral as estratégias de cópia-múltipla têm um desempenho inferior nesta métrica. Mas destaca-se que o protocolo GeoSpray consegue alcançar os melhores resultados de probabilidade e atraso de entrega, sendo eficiente em termos da utilização de recursos de largura de banda e de armazenamento.

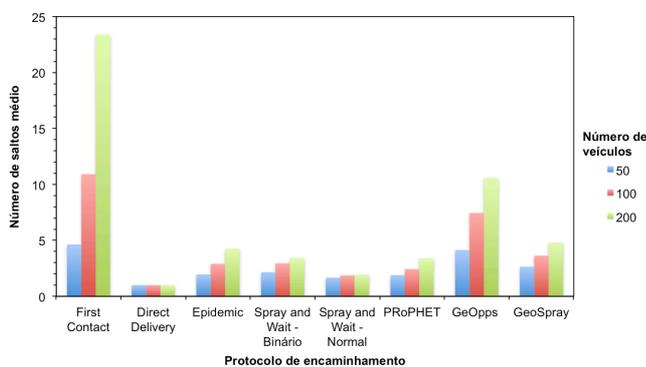


Fig. 13. Número de saltos médio em cenários com 50, 100 ou 200 veículos, para os protocolos de encaminhamento First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray.

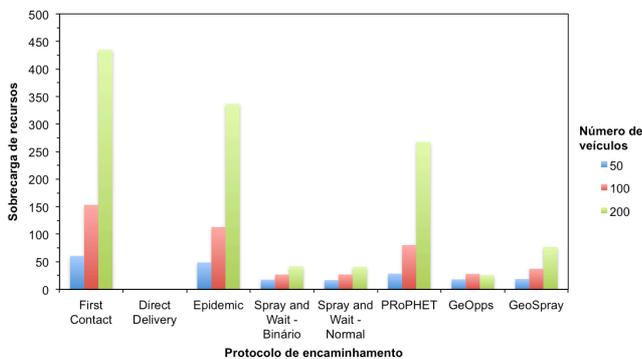


Fig. 14. Sobrecarga de recursos em cenários com 50, 100 ou 200 veículos, para os protocolos de encaminhamento First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray.

IV. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste artigo discutiu-se a utilização de protocolos de encaminhamento baseados no paradigma de “armazenamento, transporte e envio de agregados” em redes veiculares com ligações intermitentes, designadas de redes VDTN. Apresentaram-se os protocolos de encaminhamento de

referência propostos na literatura para redes do tipo DTN, os quais foram depois avaliados extensivamente através de um estudo de simulação.

Concretamente, os protocolos First Contact, Direct Delivery, Epidemic, Spray and Wait Binário e Normal, PRoPHET, GeoOpps e GeoSpray foram avaliados em cenários de rede VDTN com diferentes densidades de nós móveis. Comparou-se o seu desempenho com base em várias métricas, designadamente: número de transmissões iniciadas de agregados, número de agregados descartados, probabilidade de entrega de agregados, tempo médio do atraso na entrega de agregados, número de saltos médio e sobrecarga de recursos.

Observou-se que o GeoSpray apresenta os melhores resultados. Melhora significativamente a probabilidade de entrega de agregados e reduz o tempo médio do atraso na entrega de agregados, quando comparado com os outros protocolos de encaminhamento. Além disso, apresenta uma baixa taxa de agregados descartados e baixa sobrecarga de recursos, sendo portanto eficiente em termos de utilização de largura de banda e armazenamento.

No trabalho futuro pretende-se implementar o protocolo GeoSpray na *testbed* real VDTN apresentada em [31], para avaliar e validar o desempenho deste protocolo num ambiente real.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Instituto de Telecomunicações, *Next Generation Networks and Applications Group (NetGNA)*, Portugal, e pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projecto PEst-OE/EEI/LA0008/2011.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Toor, P. Muhlethaler, A. Laouiti, and A. D. L. Fortelle, "Vehicle Ad Hoc Networks: Applications and Related Technical Issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 3, pp. 74-88, 2008.
- [2] J. Jakubiak and Y. Koucheryavy, "State of the Art and Research Challenges for VANETs," in *Fifth IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC 2008) - 2nd IEEE Workshop on Broadband Wireless Access*, Las Vegas, Nevada, USA, January 10-12, 2008, pp. 912-916.
- [3] S. Yousefi, M. S. Mousavi, and M. Fathy, "Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Challenges and Perspectives," in *6th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2006)*, Chengdu, China, June 21-23, 2006, pp. 761-766.
- [4] Y. Khaleda, M. Tsukadaa, J. Santab, J. Choia, and T. Ernst, "A Usage Oriented Analysis of Vehicular Networks: From Technologies to Applications," *Journal of Communications, Academy Publisher*, vol. 4, no. 5, pp. 357-368, June 2009.
- [5] O. T. Cruces, "Applying Delay Tolerant Protocols to VANETs," Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2008.
- [6] L. Franck and F. Gil-Castineira, "Using Delay Tolerant Networks for Car2Car Communications," in *IEEE International Symposium on*

- Industrial Electronics 2007 (ISIE 2007)*, Vigo, Spain, 4-7 June, 2007, pp. 2573-2578.
- [7] E. Schoch, F. Kargl, M. Weber, and T. Leinmüller, "Communication Patterns in VANETs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 11, pp. 119-125, November 2008.
- [8] H. Füßler, M. Torrent-Moreno, M. Transier, A. Festag, and H. Hartenstein, "Thoughts on a Protocol Architecture for Vehicular Ad-hoc Networks," in *2nd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2005)*, Hamburg, Germany, March 15-16, 2005.
- [9] C.-M. Huang, J.-L. Chen, and Y.-C. Chang, *Telematics Communication Technologies and Vehicular Networks: Wireless Architectures and Applications*. Information Science Publishing, 2009.
- [10] M. Torrent-Moreno, A. Festag, and H. Hartenstein, "System Design for Information Dissemination in VANETs," in *3rd International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2006)*, Hamburg, Germany, March 14-15, 2006, pp. 27-33.
- [11] M. Zhang and R. S. Wolff, "Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in Rural Areas," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 11, pp. 126-131, 2008.
- [12] M. Zhang and R. S. Wolff, "A Border Node Based Routing Protocol for Partially Connected Vehicular Ad Hoc Networks," *Journal of Communications, Academy Publisher*, vol. 5, no. 2, pp. 130-143, February 2010.
- [13] N. Wisitpongphan, F. Bai, P. Mudalige, V. Sadekar, and O. Tonguz, "Routing in Sparse Vehicular Ad Hoc Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 8, pp. 1538-1556, October 2007.
- [14] T. D. C. Little and A. Agarwal, "An Information Propagation Scheme for VANETs," in *8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Vienna, Austria, September 13-16, 2005, pp. 155-160.
- [15] M. Abuelela and S. Olariu, "Traffic-Adaptive Packet Relaying in VANET," in *The Fourth ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2007)*, in conjunction with *ACM MobiCom 2007*, Montréal, QC, Canada, September 10, 2007, pp. 77-78.
- [16] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, "Delay-Tolerant Networking Architecture," RFC 4838, April 2007, [Online]. Available: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4838.txt>.
- [17] K. Scott and S. Burleigh, "Bundle Protocol Specification," RFC 5050, November 2007, [Online]. Available: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5050.txt>.
- [18] V. N. G. J. Soares, F. Farahmand, and J. J. P. C. Rodrigues, "A Layered Architecture for Vehicular Delay-Tolerant Networks," in *Fourteenth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC '09)*, Sousse, Tunisia, July 5 - 8, 2009, pp. 122-127.
- [19] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Single-copy Routing in Intermittently Connected Mobile Networks," in *First IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (IEEE SECON 2004)*, Santa Clara, CA, USA, October 4-7, 2004, pp. 235-244.
- [20] S. Jain, K. Fall, and R. Patra, "Routing in a Delay Tolerant Network," in *ACM SIGCOMM 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*, Portland, Oregon, USA, August 30 - September 3, 2004, pp. 145-158.
- [21] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," Duke University, Technical Report, CS-2000-06, April, 2000.
- [22] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks," in *ACM SIGCOMM 2005 - Workshop on Delay Tolerant Networking and Related Networks (WDTN-05)*, Philadelphia, PA, USA, August 22-26, 2005, pp. 252-259.
- [23] A. Lindgren, A. Doria, E. Davies, and S. Grasic, "Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks," draft-irtf-dtnrg-prophet-09, April 3, 2011, [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-prophet-09>.
- [24] I. Leontiadis and C. Mascolo, "GeoOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks," in *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2007 (WoWMoM 2007)*, Espoo, Finland, 18-21 June, 2007, pp. 1-6.
- [25] V. N. G. J. Soares, J. J. P. C. Rodrigues, and F. Farahmand, "GeoSpray: A Geographic Routing Protocol for Vehicular Delay-Tolerant Networks," *Information Fusion Journal, Elsevier*, (accepted for publication).
- [26] V. N. G. J. Soares, F. Farahmand, and J. J. P. C. Rodrigues, "VDTNsim: A Simulation Tool for Vehicular Delay-Tolerant Networks," in *15th IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (IEEE CAMAD 2010)*, Miami, FL, USA, December 3-4, 2010, pp. 101-105.
- [27] A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation," in *Second International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools 2009)*, Rome, March 2-6, 2009, pp. 1-10.
- [28] J. J. P. C. Rodrigues, V. N. G. J. Soares, and F. Farahmand, "Stationary Relay Nodes Deployment on Vehicular Opportunistic Networks," in *Mobile Opportunistic Networks: Architectures, Protocols and Applications*, M. K. Denko, Ed. USA: CRC Press – Taylor & Francis Group (hardcover), 2011, pp. 227-243.
- [29] A. Keränen and J. Ott, "Increasing Reality for DTN Protocol Simulations," Helsinki University of Technology, Networking Laboratory, Technical Report, July, 2007.
- [30] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and Focus: Efficient Mobility-Assisted Routing for Heterogeneous and Correlated Mobility," in *Fifth IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2007) Workshops - International Workshop on Intermittently Connected Mobile Ad hoc Networks (IEEE ICMAN 2007)*, White Plains, NY, USA, March 19-23, 2007, pp. 79-85.
- [31] M. C. G. Paula, J. N. Isento, J. A. Dias, and J. P. C. Rodrigues, "A Real-World VDTN Testbed for Advanced Vehicular Services and Applications," in *16th IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (IEEE CAMAD 2011)*, Kyoto, Japan, June 10-11, 2011.