

# 1

## Introdução

VANETs (*Vehicular Ad-hoc NETWORKS* — Redes *Ad Hoc* Veiculares) constituem um tipo específico de redes móveis cujos nós são veículos capazes de enviar, receber e encaminhar pacotes entre si. Em alguns casos, essas redes também contam com estações fixas, que podem melhorar a conectividade e oferecer acesso à Internet (JAM98, BEC03). Assim, as VANETs podem ser classificadas como V2V (*Vehicle-to-Vehicle*) e V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*), dependendo da disponibilidade das estações fixas (SAN08).

As redes veiculares compartilham algumas características com as MANETs (*Mobile Ad-hoc NETWORKS*) convencionais, como o dinamismo da topologia da rede e seu eventual particionamento causados pela mobilidade dos veículos. Nas VANETs, a instabilidade das conexões tende a ser maior em virtude da alta velocidade relativa dos veículos, principalmente em auto-estradas. Em contrapartida, o fato de os veículos se deslocarem exclusivamente pelas vias públicas torna seu padrão de mobilidade mais previsível, o que pode ser explorado por protocolos de roteamento (ZHA08, JER06) e aplicações sensíveis à localização (BOU08).

Outra diferença importante entre as VANETs e MANETs diz respeito a restrições quanto ao consumo de energia. Em MANETs, a frequência e o volume de dados trocados têm implicações sobre a autonomia dos nós (CAN01). Em contrapartida, as baterias automotivas são recarregadas frequentemente, oferecendo às aplicações uma fonte de energia praticamente inesgotável (SIC08).

Em ambientes urbanos, o desempenho das redes sem fio também é afetado por prédios e outros obstáculos, uma vez que atenuam a intensidade do sinal recebido pelos veículos e influencia a razão sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio*), que por sua vez é inversamente proporcional à taxa de perda de pacotes (SRI07). As transmissões sofrem, ainda, reflexões no solo e nas paredes externas dos edifícios, proporcionando múltiplos caminhos pelos quais o sinal pode se propagar entre um mesmo par transmissor-receptor. A sobreposição das componentes do sinal recebidas por esses caminhos causa a interferência conhecida por *multipath fading* (ZHA07). Outros fenômenos que podem ser

observados são a difração e o espalhamento (*scattering*) do sinal, conforme discutido em (YIN04).

A tecnologia de comunicação inter-veicular (IVC — *Inter-Vehicle Communication*) permite a implementação de diversos serviços, desde a conveniência e o entretenimento de passageiros (jogos, sistemas de navegação baseados no volume de tráfego veicular, etc.) a uma maior segurança no trânsito (avisos sobre acidentes, pista escorregadia, etc.). Essas possibilidades motivaram projetos como o FleetNet (ENK03), NoW (Network on Wheels) (FES08) e CarTALK (REI02) e a criação de consórcios como o C2C-CC (*Car2Car Communication Consortium*) (BAL07). FleetNet e NoW investigaram vários tópicos relacionados a redes veiculares, tais como *middleware* (FUS05), segurança (HAR07), roteamento (LOC05), entre outros. O consórcio C2C-CC, por sua vez, foi fundado por seis fabricantes europeus de veículos e visa a criação e estabelecimento de padrões industriais para comunicação inter-veicular.

Outros trabalhos na área de VANETs incluem: grades (*grids*) móveis formadas por veículos (AND05), sistemas de localização (LI00, KIE04) e de transporte inteligente (ITS — *Intelligent Transportation Systems*) (MAE04, WIS03, GOE03). São exemplos de aplicações pertencentes à categoria de ITS: determinação das rotas mais rápidas entre dois pontos tendo em vista a densidade de tráfego nas ruas, economia de combustível, monitoramento de congestionamento veicular (MEL06), e controle de cruzamento cooperativo adaptativo (CACC — *Cooperative Adaptive Cruise Control*) (WAN07, HAL05).

Enquanto algumas dessas aplicações empregam apenas transmissão por *broadcast* local (ou seja, no raio de um *hop*), outras dependem de roteamento *multihop*, a exemplo de jogos, *e-mail*, compartilhamento de arquivos, etc. Por esse motivo, o roteamento ainda é um importante objeto de estudo em VANETs. O problema do roteamento consiste em determinar uma seqüência de identificadores (*ids*), correspondentes aos veículos pelos quais um pacote deve ser transmitido de modo a poder ser recebido pelo seu destinatário. Embora inúmeros protocolos de roteamento para redes ad hoc tradicionais já tenham sido propostos (tais como DSDV (PER94), DSR (JOH01) e AODV (PER99)), as VANETs requerem abordagens compatíveis com suas principais características e requisitos deste tipo de rede.

Especificamente, é desejável que os protocolos levem em consideração diferentes padrões de mobilidade dos veículos, modelos de propagação de sinal e recursos normalmente disponíveis aos veículos, como sistemas de posicionamento (como o GPS (KAP05)), de localização (a exemplo de (LI00, KIE04)) e de mapas digitais (tais como TIGER (TIG08)). Dessa forma, ao contrário dos protocolos tradicionais para MANETs, é possível propagar

pacotes pelas ruas que passam mais próximo da localidade do destinatário, bem como evitar que pacotes sejam enviados através de ruas sem saída. A informação de posicionamento, por sua vez, pode ser usada para que os pacotes sejam enviados aos veículos que se encontram mais próximos do destinatário, reduzindo assim o número de saltos (*hops*) das rotas.

## 1.1

### Roteamento Geocast

A disponibilidade crescente de tecnologias como o GPS (KAP05) tornou viável o uso de *geocast*. *Geocast* é o termo que se refere, de forma genérica, ao roteamento de pacotes com base na posição geográfica das estações (COR06). De acordo com (FES08), o roteamento *geocast* pode ser subdividido em:

- *GeoBroadcast* — para a distribuição de pacotes a todos os veículos contidos em uma região;
- *GeoAnycast* — endereça qualquer veículo dentro de uma região;
- *GeoUnicast* — roteia pacotes entre dois veículos por meio de saltos intermediários (*hops*) com base em suas posições.

Outro critério de classificação dos protocolos *geocast* se refere à adoção ou não de uma fase de descoberta de rotas (COR06), análoga às abordagens reativas das MANETs (a exemplo do DSR (JOH01)). Os protocolos *geocast* podem ser orientados a transmissão de dados, representados pelo LBM (*Location-Based Multicast*) (KO99), ou orientados à criação de rotas, como o GeoTORA (GEOgraphic Temporally-Ordered Routing Algorithm) (VAI00).

É possível observar a vantagem do roteamento *geocast* em relação às abordagens convencionais utilizadas nas MANETs, que podem ser classificadas como proativas ou reativas (PER01). No primeiro caso, existe uma sobrecarga (*overhead*) considerável em termos de memória e largura de banda para disseminar e atualizar as tabelas de rotas das estações, tornando tais protocolos pouco escaláveis (PER94). Abordagens reativas, por outro lado, adotam um procedimento de descoberta de rotas sob demanda, no qual pacotes de controle são disseminados pela rede a fim de estabelecer a rota a ser seguida pelos demais pacotes. Tal procedimento, além de consumir muita largura de banda, impõe um retardo adicional à entrega do primeiro pacote de cada fluxo (JOH01).

O roteamento *geocast*, em contrapartida, se beneficia da disponibilidade da tecnologia de posicionamento para encaminhar os pacotes apenas na direção de seus destinatários. Dessa forma, evita-se o custo da manutenção e disseminação das tabelas de rotas dos protocolos proativos e se reduz o consumo de

largura de banda no caso de abordagens orientadas à descoberta de rotas. O maior benefício do roteamento *geocast* é, portanto, a *escalabilidade* (TIA03), na medida em que visa a entrega de pacotes a um baixo custo de recursos computacionais.

Outro motivo para a adoção do roteamento *geocast* em VANETs se deve ao fato de o movimento dos veículos estar confinado à topologia da malha viária. Isso permite que a rota de um pacote seja expressa como uma seqüência de ruas ou cruzamentos, que requer tanto um serviço de posicionamento quanto de mapas digitais para a escolha do próximo *salto*. Dessa forma, o *geocast* se torna uma escolha natural para roteamentos em VANETs.

### 1.1.1

#### Arquitetura Básica

A maioria dos algoritmos existentes para *geocast* pode ser dividida em duas partes: uma *heurística construtiva* e uma *estratégia de reparo* (GIO04). O objetivo da *heurística construtiva* é determinar uma rota preliminar para o envio de um pacote ao seu destinatário, normalmente computada a cada salto (*hop*). Dessa forma, o roteamento pode ser feito sem um conhecimento do estado global da rede (em termos de topologia, tráfego de pacotes, etc.).

A abordagem mais simples consiste em encaminhar cada pacote para o *vizinho* mais próximo do destinatário (KAR00). Um nó é definido como sendo *vizinho* de outro se eles puderem se comunicar diretamente entre si, ou seja, sem roteamento. O critério de proximidade adotado pode ser tanto relativo à distância em linha reta ou, no caso das VANETs, quanto ao comprimento do trajeto mais curto ao longo da topologia das ruas. Outros fatores que podem ser considerados pela *heurística construtiva* em VANETs incluem a densidade de tráfego veicular e congestionamento de pacotes.

Contudo, sempre existe a possibilidade de que a rota computada pela heurística construtiva conduza um pacote a um nó que não possua vizinhos para propagá-lo na direção determinada anteriormente. Nesse caso, diz-se que o pacote atingiu um *ótimo local* (TIA03), momento em que a *estratégia de reparo* é acionada.

Em vários protocolos ela envolve uma nova aplicação da *heurística construtiva*, mas desconsiderando-se a região em que o *ótimo local* foi detectado (SEE04, GIU05). No caso específico de VANETs em ambientes urbanos, essa região corresponde às ruas em que o veículo que detectou o *ótimo local* não possui vizinhos. Em redes tolerantes a atraso (DTNs — *Delay Tolerant Networks*) a estratégia de reparo também pode armazenar e transportar os pacotes temporariamente (*store-and-forward*), até seja detectado um *vizinho*

capaz de encaminhá-los adiante.

### 1.1.2

#### Aplicações e Limitações

O roteamento *geocast* pode ser empregado tanto em aplicações de segurança quanto para as de conveniência. Exemplos típicos de aplicações de segurança que se beneficiam do uso de *geocast* incluem alertas a motoristas sobre perigos na pista, tais como acidentes, pista escorregadia, entre outros (BEN04). Alertas emitidos por essas aplicações proporcionam aos motoristas maior tempo de reação a essas adversidades, principalmente sob condições desfavoráveis de visibilidade, como neblina ou obstrução por curvas em túneis, perto de árvores, etc. O papel do roteamento *geocast* nessas situações consiste em endereçar as mensagens de alerta a todos os veículos em situação de perigo iminente, a exemplo daqueles situados em uma região circular, centrada no ponto de perigo e com raio de algumas centenas de metros.

Aplicações de conveniência, por sua vez, podem empregar *geocast* de forma semelhante, mas sob restrições menos rígidas quanto ao retardo e taxa de entrega de pacotes, e possivelmente a longas distâncias. Como exemplos podem ser citados a mesclagem de fluxos de veículos em entroncamentos de autoestradas (*ramp metering*) (WAN07), anúncios de produtos e serviços por estabelecimentos comerciais e disseminação de informações sobre tráfego (WIS03). O problema da mesclagem de fluxos de veículos consiste em determinar que velocidade cada veículo deve adotar ao se dirigir à junção de duas ou mais estradas, de modo a otimizar o fluxo de tráfego na junção. A disseminação de informações sobre tráfego, por sua vez, permite a sistemas de navegação determinarem rotas que evitem regiões congestionadas, na tentativa de minimizar o tempo de percurso ao destino escolhido pelo motorista (MEL06, WIS03).

Aplicações que envolvem comunicação *unicast* também podem empregar *geocast* para que seus pacotes sejam roteados com maior eficiência. Dessa categoria podem ser citadas aquelas que acessam a Internet, a exemplo de *e-mail*, notícias, navegação *web* ou, em ambientes puramente *ad hoc*, programas de bate-papo (*chat*), jogos e compartilhamento de arquivos como músicas, vídeos, etc. Em todos os casos, torna-se necessário descobrir a localização do destinatário dos pacotes a serem enviados, o que também pode ser feito por *geocast*. Assim, um usuário que deseje iniciar um jogo com um passageiro de outro veículo precisa descobrir alguém com o mesmo interesse, o que consiste em uma aplicação de *geoAnycast*. Uma vez conhecidos, os jogadores se comunicam entre si por meio de *geoUnicast*.

Protocolos de roteamento *geocast* têm limitações intrínsecas. Uma delas

se refere aos *ótimos locais*, provocados pela ausência de veículos na direção do destinatário. Adicionalmente, protocolos que constroem rotas *exclusivamente* em função das posições do destinatário, do veículo atual e de seus *vizinhos* (veículos com os quais ele pode se comunicar diretamente, ou seja, sem roteamento) podem encaminhar os pacotes para regiões cujo meio sem fio esteja congestionado. Essas limitações, combinadas ao dinamismo das VANETs, impedem que sejam dadas garantias a respeito da taxa de entrega de pacotes ou limites (mínimo e máximo para o retardo).

## 1.2 Contribuições

Tendo em vista as características das VANETs apresentadas neste capítulo, esta tese propõe dois novos algoritmos de roteamento para cenários urbanos: U-GPSR (Urban Greedy Perimeter Stateless Routing) e TLAR (Traffic Light Aided Routing). O U-GPSR é uma versão melhorada do protocolo GPSR (KAR00) e adaptada para o cenário urbano. O TLAR, por sua vez, constrói suas rotas de acordo com as probabilidades de um pacote conseguir se propagar com sucesso ao longo de cada rua. Esses valores são estimados em função de estatísticas de tráfego e das mudanças de estado dos semáforos.

Outra contribuição desta tese é a implementação e simulação das abordagens propostas e de algumas alternativas existentes na literatura. De modo a conferir aos experimentos maior grau de realismo, foram utilizados simuladores de tráfego veicular (KRA02), de redes *ad hoc* (MCC09) e de propagação de sinal (SRI07). Os resultados são discutidos de modo a analisar a influência de cada parâmetro de simulação no desempenho dos algoritmos. Portanto, a curvatura da função que mapeia o número de *hops* na quantidade de pacotes entregues irá determinar o desempenho de um determinado algoritmo.

Os critérios adotados para a comparação dos algoritmos são o número de pacotes entregues com sucesso, o número de saltos (*hops*) intermediários nas rotas, o retardo de propagação de cada pacote, a quantidade de colisões no meio sem fio e o consumo de banda passante, tanto pelos pacotes de dados quanto pelos de sinalização. Os dois primeiros critérios são analisados conjuntamente: a quantidade de pacotes entregues ao destinatário é apurada de acordo com o número de saltos intermediários de cada rota.

Esse critério permite analisar, separadamente, a eficiência da heurística construtiva e da estratégia de reparo dos algoritmos simulados. Se um algoritmo atinge uma alta taxa de entrega para rotas curtas (em número de saltos), sua heurística construtiva é eficiente. Por outro lado, uma taxa de entrega baixa para as rotas mais curtas, mas que atinge valores elevados para rotas mais lon-

gas é consequência de uma boa estratégia de reparo. Valores altos tanto para o retardo de propagação dos pacotes quanto para o número de colisões no meio sem fio indicam que o algoritmo sendo testado está concentrando suas rotas em alguma região do cenário de simulação. Finalmente, o consumo de banda passante pelos pacotes de dados e de sinalização permite determinar qual o percentual da informação sendo transmitida se refere aos dados da aplicação.

O restante desta tese está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma caracterização geral de VANETs, incluindo aspectos da propagação de sinal e discutindo os principais tipos de aplicações. O Capítulo 3, por sua vez, aborda o roteamento em geral nas redes veiculares, enquanto o Capítulo 4 apresenta os algoritmos propostos, o modelo de VANET adotado e alguns trabalhos relacionados. A seguir, o Capítulo 5 apresenta e discute os resultados da simulação dos algoritmos propostos, comparando-os ao desempenho obtido por algumas abordagens existentes. Finalmente, o Capítulo 6 conclui a tese, apontando algumas opções de trabalhos futuros.