

3

Roteamento em VANETs

Roteamento tem sido um importante assunto de pesquisa em redes *ad hoc*. A adaptação de protocolos existentes (como DSR (JOH01), AODV (PER99), etc.) foi a abordagem inicial para o roteamento em VANETs, mas estes protocolos apresentaram desempenho insatisfatório (LU06, JAA05, NAU06) em face às características particulares das redes veiculares, mencionadas no Capítulo 1.

Contudo, a disponibilidade crescente das tecnologias de posicionamento, como o GPS (KAP05), tornou viável o uso de protocolos baseados em posição (*PBR — Position Based Routing*), como o LAR (*Location Based Routing*) (KO00) e o GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) (KAR00). Nessas abordagens, assume-se que cada veículo disponha da informação de sua posição, da dos seus vizinhos e da do destinatário do pacote que a ser roteado, sendo que a posição do destinatário pode ser obtida por meio de um serviço de localização (GRO03, LI00, KIE04).

O protocolo GPSR, originalmente concebido para redes *ad hoc* convencionais, encaminha os pacotes para veículos sucessivamente mais próximos do destinatário, ou seja, trata-se de uma abordagem gulosa. Mesmo não sendo específico para redes veiculares, este protocolo é frequentemente usado como referência na comparação com outros protocolos, e por essa razão é discutido em maiores detalhes na Seção 3.5. As seções seguintes discutem algumas das propostas mais importantes da literatura no campo do roteamento em VANETs.

3.1

SAR

Em cenários urbanos, a topologia da malha viária pode impor dificuldades adicionais aos protocolos de roteamento entre nós móveis *ad hoc*. Especificamente, eles devem evitar a propagação de pacotes por ruas sem saída ou que, mesmo escolhendo locais cuja distância aérea ao destinatário seja em dado momento menor, acabem proporcionando caminhos mais longos em função de curvas ou de desvios impostos ao tráfego de veículos.

Com o advento dos sistemas de mapas digitais, novos protocolos, específicos para VANETs, assumem que cada veículo dispõe tanto de sua posição atual quanto da topologia das ruas, um pré-requisito aceitável, tendo em vista penetração crescente da tecnologia de comunicação inter-veicular. O principal representante dessa categoria é o SAR (*Spatially Aware Routing*) (TIA03), que mapeia a topologia urbana em um grafo cujas arestas são as ruas e os vértices são os cruzamentos (tal grafo será denominado *grafo urbano* neste capítulo). Antes de um veículo enviar cada pacote, o algoritmo de Dijkstra é usado para determinar o caminho mais curto, segundo a topologia das ruas, até o respectivo destinatário. A seqüência de cruzamentos que compõe esse caminho é armazenada no cabeçalho do pacote, de modo que cada veículo, ao recebê-lo, possa encaminhá-lo para o vizinho que proporcionar o maior progresso ao longo dessa rota. Caso nenhum vizinho satisfaça essa condição, diz-se que o pacote atingiu um *ótimo local* e a rota é recomputada para passar por ruas alternativas.

É importante observar que a construção de rotas baseada exclusivamente no mapa da cidade pode conduzir os pacotes por ruas onde haja pouco tráfego. Nesses casos, é alta a probabilidade de um *ótimo local* ser atingido, o que aciona a estratégia de reparo dos protocolos e diminui sua eficiência. Tendo em vista esse fato, várias alternativas como o GyTAR (JER06), A-STAR (SEE04), VADD (ZHA08) e STAR (GIU05) combinam a informação sobre a topologia das ruas com alguma informação estatística sobre o tráfego nelas.

3.2 GyTAR e A-STAR

O protocolo GyTAR (*improved Greedy Traffic Aware Routing*) emprega *beacons* para descobrir quantos *veículos equipados* existem em cada rua. Periodicamente, o veículo mais próximo de cada cruzamento envia um *beacon* ao longo de todas as ruas que partem desse cruzamento, destinados às extremidades opostas delas. Esses *beacons* possuem um contador, inicialmente nulo, ao qual cada veículo soma o número de vizinhos que possui entre si mesmo e o cruzamento de destino do *beacon*. Desse modo, ao atingi-lo, o *beacon* possuirá o número de *veículos equipados* contidos na rua que percorreu.

A rota de cada pacote é computada localmente e sob demanda, toda vez que um pacote chega a um cruzamento. Cada cruzamento adjacente ao atual recebe uma pontuação em função da quantidade de veículos presentes na rua que leva até ele e sua distância ao destinatário do pacote (ao longo da topologia das ruas). O cruzamento de maior pontuação é então selecionado como o próximo da rota, e o pacote é encaminhado a ele de forma gulosa.

Se um *ótimo local* for atingido, a estratégia de reparo do GyTAR consiste em armazenar o pacote na memória do veículo atual até que ele chegue ao próximo cruzamento ou que este se torne alcançável pelo surgimento de um novo vizinho naquela direção.

A principal desvantagem desse protocolo é que somente a informação sobre o tráfego das ruas adjacentes é utilizada na escolha das rotas, enquanto o algoritmo proposto nesta tese (TLAR — *Traffic Light Aided Routing*) explora tanto a informação contida na lista de vizinhos quanto as estimativas das conectividades nas ruas mais afastadas. Além disso, a estratégia de reparo do TLAR produz rotas alternativas com retardos muito menores que os obtidos pelo armazenamento temporário de pacotes em veículos intermediários. Em compensação, a abordagem do TLAR falhará se remetente e destinatário de um pacote estiverem em partições diferentes da VANET.

O protocolo A-STAR (*Anchor-based Street and Traffic Aware Routing*), por sua vez, assume que os veículos dispõem de uma cópia do itinerário dos ônibus, e que as ruas mais percorridas por eles têm maior densidade de tráfego. Este protocolo usa uma variante do *grafo urbano* em que cada aresta (rua) tem um peso inversamente proporcional à quantidade de linhas de ônibus que passam por ela. O algoritmo de Dijkstra é então utilizado para encontrar o caminho de menor peso ao destinatário.

3.3 VADD

Outra proposta em que a informação sobre o volume de tráfego é usada no cálculo das rotas é VADD (*Vehicle Assisted Data Delivery*), que também é aplicável às redes tolerantes a atraso (DTN — *Delay Tolerant Network*). Ele requer um sistema de mapas digitais que contenha estatísticas do volume de tráfego em cada rua, que são usadas para estimar o retardo esperado para um pacote se propagar por cada uma. Se a quantidade média de veículos em uma rua estiver acima de um certo limiar, assume-se que exista uma rota entre suas extremidades, e que o retardo esperado será baixo (da ordem de milissegundos). Do contrário, ao se enviar um pacote por essa rua, ele provavelmente terá de ser armazenado em algum veículo até que a propagação pelo meio sem fio se torne possível novamente na direção desejada. Nesse caso, o retardo será proporcional ao tempo esperado de travessia de um veículo por essa rua (da ordem de segundos).

O protocolo modela a chegada de veículos por uma distribuição de Poisson e calcula, para cada cruzamento X e cada rua XY que vai do cruzamento X ao Y , a probabilidade de um veículo situado em X possuir

pelo menos um vizinho em XY . Esse valor depende basicamente do alcance da comunicação sem fio e da média de veículos em cada rua. O valor esperado do retardo total de uma rota pode, então, ser calculado em função desses retardos e probabilidades. Finalmente, o próximo cruzamento de uma rota é selecionado como aquele que pertence ao caminho de menor retardo até o destinatário.

Os protocolos VADD e TLAR apresentam certa similaridade, apesar de somente o primeiro ser destinado a DTNs. Ambos empregam um modelo probabilístico para construir rotas, porém o TLAR usa um simulador de tráfego para gerar o padrão de mobilidade dos veículos, enquanto o VADD assume que a chegada de veículos segue uma distribuição de Poisson. Acreditamos que a abordagem do TLAR seja mais realista nesse aspecto, uma vez que a duração e a defasagem dos estados dos semáforos impõe padrões mais complexos de mobilidade em cenários urbanos. Desse modo, o TLAR conta com uma informação mais específica sobre a variação ao longo do tempo da concentração de veículos em ruas distantes, enquanto o VADD calcula suas rotas em função de seu valor médio. Soluções alternativas, como o STAR (*Spatial and Traffic Aware Routing*) envolvem o uso de *beacons* para estimar o volume de tráfego em cada rua e disseminá-lo. Os detalhes dessa abordagem são discutidos na Seção 3.6.

Outra diferença entre o VADD e o TLAR é que este considera a taxa de penetração da tecnologia de IVC no mercado, e o conseqüente espalhamento dos *veículos equipados* ao longo das ruas (efeito discutido na Seção 5.2.4). Isso permite ao TLAR estimar com maior precisão a probabilidade de um pacote se propagar com sucesso ao longo de uma rua. Finalmente, uma vez que o TLAR não se aplica a VANETs desconexas, isto é, particionadas, ele falharia em entregar pacotes a outras partições, ao contrário do que ocorre com o VADD. Isso se deve à característica de DTN (*Delay Tolerant Network* — rede tolerante a atraso) do protocolo VADD.

3.4 GeOpps

GeOpps (*GEographic OPPortunistic routing*) (LEO07) é um algoritmo de roteamento para VANETs destinado a aplicações tolerantes a atraso. Ele assume que cada veículo disponha da informação sobre sua posição atual, bem como a do destinatário do pacote sendo roteado. Além dessas informações, as rotas são construídas considerando-se também as estatísticas de tráfego em cada rua, a topologia das ruas da cidade e o trajeto que os motoristas vão seguir, que podem ser obtidos de um sistema de navegação veicular.

Para determinar qual o próximo veículo da rota de um pacote, o algoritmo

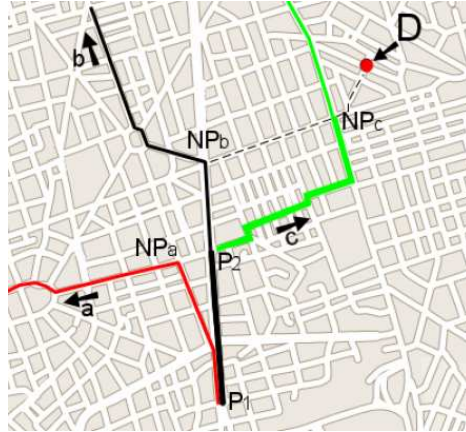


Figura 3.1: Determinando o ponto mais próximo da rota de um veículo ao destinatário de um pacote.

estima qual o tempo necessário para que esse pacote chegue a seu destinatário se for conduzido pelo veículo atual, ou seja, aquele que o estiver armazenando no momento em que o pacote for roteado. Conforme ilustrado na Figura 3.1, esse valor depende do trajeto que será seguido pelo veículo, principalmente do ponto desse trajeto que estiver mais próximo ao destinatário do pacote. A estimativa do tempo de entrega do pacote (*METD* — *Minimum Estimated Time of Delivery*) é calculado pela Equação 3-1.

$$METD = ETA(curr_pos, NP) + ETA(NP, D), \quad (3-1)$$

onde $ETA(x, y)$ é o tempo estimado para o veículo atual trafegar entre os pontos x e y , $curr_pos$ é a posição atual do veículo e NP é o ponto mais próximo do trajeto do veículo à posição do destinatário do pacote (D).

Cada veículo periodicamente emite *beacons* contendo as posições dos destinatários dos pacotes que estiver armazenando. Os veículos que recebem um *beacon* aplicam a Equação 3-1 para cada uma dessas posições individualmente, a fim de estimar o tempo que levariam para conduzir os pacotes em questão aos seus respectivos destinatários. A seguir, eles transmitem essa informação de volta ao veículo que enviou o *beacon*, que por sua vez determina, para cada pacote, se deve continuar a armazená-lo ou para qual vizinho deve encaminhá-lo.

Para cada pacote, essa decisão é tomada em função das estimativas de tempo de entrega calculadas pelo veículo atual e por seus vizinhos. Se a estimativa calculada pelo veículo atual for menor que os valores calculados por todos os seus vizinhos, o veículo continua a armazenar o pacote. Do contrário, ele o encaminha para o vizinho que estimou o menor tempo de entrega.

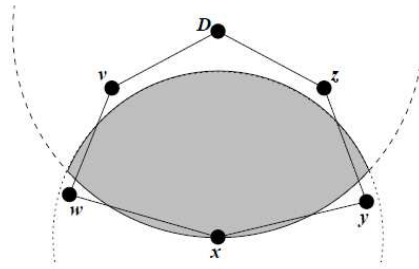


Figura 3.2: Um exemplo de ótimo local.

3.5 GPSR

Neste protocolo, cada veículo periodicamente envia *beacons* contendo sua posição, de modo a manter uma lista de vizinhos. Se um pacote destinado ao veículo D atinge um ótimo local no veículo x , isso significa que existe uma região em que x não possui vizinhos cuja distância ao destinatário seja menor que a distância deste veículo ao próprio x , destacada em cinza na Figura 3.2. Essa região é a interseção dos círculos que representam o alcance de comunicação de x e a área que contém todos os veículos cuja distância a D é menor que \overline{xD} .

O objetivo da estratégia de reparo é contornar essa área, de modo que o roteamento guloso possa ser retomado. O pacote deve ser enviado ao primeiro vizinho de x a ser atingido pela rotação de uma semi-reta imaginária xD em relação a x no sentido anti-horário (regra da mão direita). No caso da Figura 3.2, trata-se do veículo w .

A partir de então, o próximo veículo é escolhido por aplicações sucessivas da regra da mão direita, apresentada a seguir. Esse procedimento é repetido até que o pacote chegue a um veículo cuja distância ao destinatário seja inferior àquela entre veículo x , onde o ótimo local foi detectado e o destinatário. Retomando o exemplo da Figura 3.2, a estratégia de reparo é iniciada em x e mantida até atingir v , visto que $\overline{vD} < \overline{xD}$.

3.5.1 Regra da Mão Direita

Seja G um grafo cujos vértices são os veículos de uma VANET e que possui uma aresta conectando dois veículos X e Y se, e somente se, eles estiverem *diretamente comunicáveis* entre si. Sejam, ainda, AB e AC arestas de G , tais que AB é a primeira aresta a ser encontrada pela rotação de AC em torno de A em sentido anti-horário, como na Figura 3.3. A *regra da mão direita* determina que se A receber um pacote de C , deverá encaminhá-lo para

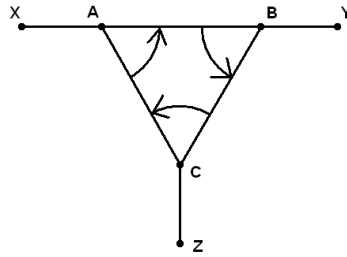


Figura 3.3: Aplicação da regra da mão direita.

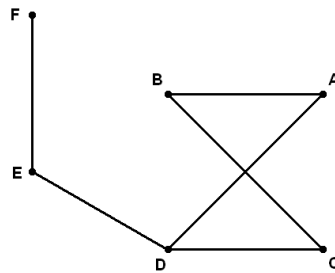


Figura 3.4: A regra da mão direita falhando em grafo não-planar.

B.

Aplicando-se mais uma vez essa regra no exemplo da Figura 3.3, *B* recebe o pacote de *A* e faz uma rotação anti-horária de *AB* em torno de *B*, interceptando o vértice *C*. É fácil observar que a regra da mão direita confina o pacote no ΔABC , fazendo-o circular em sentido horário.

3.5.2 Planarização da Topologia

Uma limitação da regra da mão direita é que ela pode falhar se aplicada a grafos que não sejam planares. Um grafo é dito planar se puder ser representado em um plano sem que nenhum par de arestas se cruze. A Figura 3.4 mostra um grafo que não é planar, devido ao cruzamento das arestas *AD* e *BC*. Nesse caso, um pacote enviado de *A* para *F* percorreria o seguinte caminho:

1. *A* envia o pacote para *B*, por ser o vizinho mais próximo de *F*.
2. *B* não possui vizinhos mais próximos de *F* do que si próprio, por isso encaminha o pacote para *C*, por ser o primeiro veículo encontrado pela rotação anti-horária da semi-reta *BF* em torno de *B* (regra da mão direita).
3. Aplicando a regra da mão direita, *C* escolhe *D* como próximo *hop*.

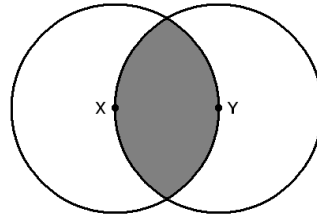


Figura 3.5: Região que contém os vizinhos a serem eliminados.

4. D não pode encaminhar o pacote para E , pois $\overline{EF} > \overline{BF}$. Ao aplicar a regra da mão direita, determina que deve reenviar o pacote para A .

Como esse exemplo mostra, cada veículo precisa limitar o conjunto de vizinhos aos quais o pacote pode ser encaminhado, a fim de que o grafo G , correspondente à VANET, se mantenha sempre planar. Ao se fazer isso, é necessário eliminar arestas (ou seja, evitar que um par de veículos A e B encaminhe um pacote de um para o outro), de modo que, se existir um caminho entre qualquer par de vértices X e Y no grafo original, sua versão planarizada ainda possua um caminho entre esses vértices. Em outras palavras, a planarização de um grafo não deve particioná-lo.

Uma maneira de conseguir esse efeito é reduzi-lo a um grafo de vizinhança relativa (RNG — *Relative Neighborhood Graph*) (JAR92), no qual uma aresta XY só existe no grafo se seu comprimento for menor ou igual do que a distância de qualquer outro vértice Z à extremidade mais afastada dessa aresta em relação a Z , ou seja:

$$\forall Z \neq X, Y : \overline{XY} \leq \max(\overline{ZX}, \overline{ZY}) \quad (3-2)$$

A interpretação geométrica da Inequação 3-2 é mostrada na Figura 3.5, onde as circunferências delimitam o lugar geométrico de todos os vizinhos de X e Y , ou seja, representam o alcance da transmissão sem fio desses veículos. Qualquer vértice Z na região destacada violaria a Inequação 3-2. Assim, ao aplicar a regra da mão direita cada veículo deve ignorar os vizinhos que violem essa condição, sob pena de a aresta que o une a tal vizinho tornar o grafo não-planar.

3.6 STAR

STAR (GIU05) é um exemplo de protocolo em que as condições de tráfego são continuamente monitoradas e, quando consideradas relevantes, disseminadas entre os veículos. Desse modo, é possível detectar, em tempo real, as ruas com alta ou baixa densidade de tráfego, sendo que uma alta

densidade favorece o roteamento dos pacotes. O protocolo é organizado em duas sub-camadas: uma é responsável pelo monitoramento do tráfego de veículos, enquanto a outra se encarrega da construção de rotas.

3.6.1

Monitoramento do Tráfego

Nesta sub-camada, cada veículo monitora o tráfego em suas proximidades por meio de três estruturas de dados que são atualizadas de acordo com a evolução de sua lista de vizinhos ao longo do tempo. O *vetor de presença* possui um contador para cada ponto cardeal (norte, sul, leste e oeste) que registra quantos vizinhos um veículo possui nessa direção no momento atual.

O *vetor de persistência*, por sua vez, possui uma entrada para cada contador do *vetor de presença*, que registra por quanto tempo ele permaneceu ininterruptamente acima de um limite *highPR* ou abaixo do valor *lowPR*. Essas situações implicam, respectivamente, o excesso ou escassez de veículos em alguma direção durante um certo período de tempo. O propósito do *vetor de persistência* é, portanto, impedir que flutuações efêmeras no volume de tráfego sejam disseminadas.

Por outro lado, se algum dos contadores do *vetor de persistência* exceder um limite pré-estabelecido, a condição de tráfego (alta ou baixa) a que ele se refere é considerada duradoura, e registrada na *tabela de tráfego*. A função dessa tabela é, portanto, armazenar toda a informação que um veículo possui sobre ruas distantes, de modo a poder construir um *grafo urbano* (procedimento explicado na Seção 3.6.2).

Além disso, uma vez detectada, a anomalia de tráfego precisa ser disseminada para que os outros veículos possam favorecer ou evitar a rua a que ela se refere, conforme for o caso. Toda vez que um veículo emite um *beacon*, ele insere as entradas de sua *tabela de tráfego* que ainda não foram disseminadas (*bit already sent*). Ao receber um *beacon*, os demais veículos copiam as entradas contidas nele para suas próprias *tabelas de tráfego*, ignorando eventuais duplicatas. Para evitar que uma mesma entrada transite pela VANET indefinidamente, cada entrada possui um tempo de vida em *hops*. Uma entrada na *tabela de tráfego* possui as seguintes informações:

- A posição em que o veículo se encontrava quando a entrada foi inserida na tabela ou atualizada pela última vez;
- A direção (norte, sul, leste ou oeste) relativa ao campo anterior em que a anomalia foi detectada;
- Um *flag* que especifica se a anomalia consiste em excesso ou escassez de veículos;

- Um *flag already sent* indicando se esta entrada da tabela de tráfego já foi disseminada. Isso impede que uma mesma entrada seja disseminada mais de uma vez;
- O tempo de vida (em *hops*), de modo a limitar a área na qual essa informação é disseminada;
- O tempo de validade dessa entrada.

3.6.2

Construção de Rotas

As rotas no STAR são computadas pela aplicação do algoritmo de Dijkstra a um *grafo urbano*, cujas arestas inicialmente têm peso diretamente proporcional ao comprimento das ruas a que se referem. Esses pesos são ajustados de acordo com a *tabela de tráfego* do veículo: cada entrada correspondente a um baixo volume de tráfego em alguma rua proporciona um aumento do peso da aresta em questão, ao passo em que entradas indicativas de uma alta concentração de veículos implicaria uma redução desse valor. Assim, ruas com baixa densidade de tráfego tenderão a ser evitadas ainda que proporcionem um caminho geograficamente mais curto ao destinatário.

Após determinar o caminho de peso mínimo, os n próximos cruzamentos são armazenados no cabeçalho do pacote, onde n é um parâmetro de configuração. Valores grandes para n implicam cabeçalhos maiores em cada pacote, mas proporcionam uma economia em tempo de processamento, uma vez que a rota precisa ser recomputada com uma frequência menor. Por outro lado, valores pequenos para n resultam em cabeçalhos menores, mas requerem que a rota seja recalculada freqüentemente.

Ao rotear um pacote, cada veículo aplica a heurística gulosa para encaminhá-lo na direção do próximo cruzamento indicado no cabeçalho. Caso o último já tenha sido alcançado, o algoritmo de Dijkstra é utilizado para determinar os seguintes. Se, por outro lado, não existirem vizinhos na direção do próximo cruzamento, o protocolo associa à rua em questão um peso elevado e recalcula a rota.

É possível observar que o protocolo STAR emprega tanto as informações sobre a topologia das ruas quanto as sobre volume de tráfego para calcular rotas. A disseminação constante das anomalias de tráfego tende a melhorar a taxa de entrega e o retardo dos pacotes, contudo impõe um custo considerável em termos de banda passante. O TLAR, por outro lado, emprega estatísticas de tráfego ao longo do dia combinadas à informação dos estados dos semáforos para calcular as *conectividades reta e cruzada*. Como resultado, o *overhead* do TLAR é menor que o do STAR, mas em compensação dispõe de menor

Protocolo	Escopo	Estado	Positionamento	Mapa	Tráfego
AODV / DSR	MANET	Sim	Não	-	Não
GPSR	MANET	Não	Sim	-	Não
U-GPSR	VANET	Não	Sim	Topológico	Não
SAR	VANET	Não	Sim	Topológico	Não
GyTAR	DTN	Não	Sim	Topológico	Dinâmico
A-STAR	VANET	Não	Sim	Estatístico	Estático
VADD	DTN	Não	Sim	Estatístico	Estático
GeOpps	DTN	Não	Sim	Estatístico	Estático
STAR	VANET	Não	Sim	Topológico	Dinâmico
TLAR	VANET	Sim	Sim	Estatístico	Estático

Tabela 3.1: Comparação dos protocolos de roteamento para VANETs.

precisão a respeito da densidade dos veículos em cada rua. A comparação dessas abordagens é, portanto, análoga à dos protocolos proativos e reativos das redes *ad hoc* convencionais.

3.7

Resumo

Uma vez apresentadas as principais propostas da literatura para o roteamento em VANETs, um resumo da comparação entre elas pode ser visualizado na Tabela 3.1.

A coluna *Escopo* especifica o tipo de rede para o qual cada protocolo foi proposto. A classificação quanto ao *estado* se refere a qualquer informação utilizada no roteamento que não seja constante, nem oriunda do cabeçalho do pacote e nem derivada de medições de tráfego (pois já possuem uma coluna específica na tabela). São exemplos de informação de estado, sob essa definição, a tabela de penalidades do TLAR ou a *cache* de rotas do DSR ou AODV. O quesito *Posicionamento*, por sua vez, indica se o protocolo emprega algum sistema que informe a localização do veículo que o estiver usando, enquanto a coluna seguinte informa se algum sistema de mapas digitais é necessário para o funcionamento dos protocolos. A tabela se refere como *topológico* aos mapas que informam apenas a topologia das ruas, ao passo que os chamados *estatísticos* também possuem informações sobre a densidade de tráfego em cada uma delas ao longo do dia e da semana. Finalmente, o último critério de comparação avalia o tipo de informação sobre o tráfego utilizada, que pode ser *estático* ou *dinâmico*. São classificadas como *estáticas*, as abordagens que consistem em bases de dados previamente carregadas na memória dos veículos, a exemplo do itinerário dos ônibus utilizado pelo A-STAR ou os mapas *estatísticos* empregados pelo TLAR ou VADD. Por outro lado, a informação de tráfego é dita dinâmica se for inferida em tempo real com base na lista de

vizinhos, velocidade média dos veículos, etc.

A comparação do TLAR com os demais protocolos o coloca no mesmo patamar de propostas sofisticadas, como o STAR e o VADD. Esses protocolos calculam suas rotas em função não apenas da topologia das ruas, mas também do volume de tráfego nelas. Tal informação pode ser obtida por sensoriamento e disseminação, a um custo considerável de banda passante, como no STAR, ou usando estatísticas, como no VADD, dessa forma desconsiderando as flutuações decorrentes do funcionamento dos semáforos, por exemplo. Por outro lado, o TLAR infere a informação relativa ao tráfego de veículos (*conectividades reta e cruzada*) de acordo com o ciclo dos semáforos e a vazão média de veículos em cada rua.

De todas as abordagens apresentadas, o VADD é aquela que mais se parece com o TLAR. Uma das principais diferenças entre eles reside no fato de o TLAR explorar as flutuações do fluxo do tráfego impostas pelo ciclo dos semáforos. Além disso, o TLAR emprega um modelo de obstrução de sinal que, apesar de simplificado, lhe confere maior grau de realismo do que o atingido por alternativas como o *two-ray ground*.