

2 Redes Veiculares

Redes veiculares são um caso específico de redes *ad hoc* e, por esse motivo, possuem algumas características em comum. Um exemplo de tais características são as constantes mudanças em suas topologias provocadas pela mobilidade das estações, que acarretam desconexões freqüentes. Ao mesmo tempo, em virtude do fato de as estações que formam as VANETs serem veículos, elas exibem padrão de mobilidade particular.

Uma especificidade do padrão de mobilidade está relacionado às velocidades das estações. Em auto-estradas, veículos podem se deslocar a velocidades muito altas, possivelmente em direções opostas, o que diminui a janela de tempo durante a qual dois veículos podem se comunicar diretamente (BLU03). Outro aspecto importante do padrão de mobilidade dos veículos é que eles se deslocam exclusivamente ao longo das ruas, estradas e avenidas, o que torna seu padrão de mobilidade mais previsível.

Por outro lado, o tráfego de um conjunto de veículos é influenciado por diversas variáveis, como a hora do dia, semáforos, eventos especiais (tais como acidentes ou chuva) e a posição de outros veículos à frente. Essas características do tráfego veicular podem ser modeladas de forma *microscópica* ou *macroscópica*. Modelos microscópicos determinam a posição e a velocidade de cada veículo, incluindo manobras de ultrapassagem, mudança de faixa e manutenção de uma distância de segurança ao veículo da frente. Abordagens *macroscópicas*, por outro lado, modelam o tráfego veicular por meio de fluxos (LEU94, BAR02).

Outra característica importante das VANETs é a disponibilidade de uma fonte de energia quase ilimitada, uma vez que as baterias automotivas são recarregadas constantemente. Além disso, cada vez mais veículos dispõem de recursos tecnológicos como o GPS e outros sensores (BLU04). O GPS (*Global Positioning System*) (KAP05) é um sistema de posicionamento que consiste de vinte e quatro satélites dispostos de modo que pelo menos quatro sejam visíveis de qualquer ponto do globo terrestre. Cada receptor GPS captura sinais emitidos por esses satélites e calcula sua posição por meio de trilateração (STA72).

Contudo, obstáculos como prédios, rochas e árvores podem bloquear ou interferir no sinal captado dos satélites, diminuindo a precisão do posicionamento em centros urbanos, áreas cobertas, florestas, etc. O erro da informação de posicionamento pode ser reduzido ao se combinar o GPS com outras técnicas, a exemplo de navegação estimada (*dead reckoning*) (KIN06, SHA03), acompanhamento por mapas (*Map Matching*) (JOS02) e localização celular (CAF98, ALE06). O uso de técnicas de fusão de dados (*Data Fusion*) (NAK07) para essa finalidade é investigada em (BOU08).

A tecnologia de comunicação sem fio sendo proposta para redes veiculares, o IEEE 802.11p, ainda se encontrava em estágio de padronização em setembro de 2008 (WAN08). Versões preliminares (*drafts*) desse padrão utilizam a faixa de frequência de 75 MHz no espectro de 5.9 GHz reservada pela FCC (Federal Communications Commission) nos EUA para essa finalidade. Essa faixa de frequência de 75 MHz é dividida em sete canais de 10 MHz cada, deixando uma margem de segurança de 5 MHz na parte inferior da banda. A especificação IEEE 802.11p dedica especial atenção a aplicações de segurança, a exemplo de notificações de acidentes ou pista escorregadia. De modo a proporcionar maior tempo de reação do motorista a tais eventos de risco, o padrão adota uma potência de transmissão máxima (EIRP — *Effective Isotropic Radiated Power*) de 44.8 dBm, visando atingir um alcance de comunicação da ordem de 1000 metros (STI07).

O restante deste capítulo está organizado como se segue: a Seção 2.1 resume as principais características da propagação de radiofrequência nas VANETs, enquanto a Seção 2.2 discute algumas das aplicações que podem ser implementadas nas redes veiculares. Finalmente, a Seção 2.3 especifica o tipo abordado de VANETs nesta tese e as aplicações a que se destina.

2.1 Propagação de Radiofrequência

Em redes sem fio a comunicação entre estações é feita por meio de antenas, capazes de enviar e receber ondas eletromagnéticas. No caso específico das VANETs, a FCC (*Federal Communications Commission*) alocou a faixa de frequência de 5.9 GHz (STI07).

Como todas as ondas de radiofrequência, o sinal emitido pelos veículos se atenua à medida em que se afasta da antena emissora, e ainda pode sofrer reflexão, refração, difração e difusão (*scattering*) quando se depara com obstáculos, tais como árvores, prédios e postes. Por esses motivos, a modelagem adequada da propagação de sinal assume papel importante na simulação de sistemas baseados em comunicação sem fio.

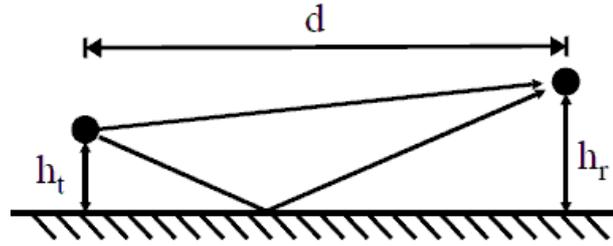


Figura 2.1: Propagação no modelo *two-ray ground*.

Um dos modelos de propagação mais simples é o *free space* (AND95). Nesse modelo, assume-se que o sinal pode se propagar livremente, sem ser afetado por obstáculos, e sofre a atenuação inversamente proporcional ao quadrado da distância (d) da antena que o emitiu (Equação 2-1).

$$P_{r,FS} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (2-1)$$

onde $P_{r,FS}$ é a intensidade do sinal no receptor, P_t é a potência de transmissão, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissoras e receptoras e λ é o comprimento de onda.

Porém, sinais de rádio também podem chegar ao receptor por reflexão no solo, como mostra a Figura 2.1. Nesse caso, o sinal recebido é a soma de duas componentes: a que se propaga diretamente pela linha reta até o receptor e a fração do sinal que refletiu no solo. O modelo *two-ray ground* (AND95) determina a intensidade do sinal recebido considerando ambas as componentes. A reflexão no solo pode causar interferência construtiva ou destrutiva, dependendo da distância entre transmissor e receptor (d), da altura das antenas (h_t e h_r) e do comprimento de onda (λ). Assumindo-se constantes os valores de h_t , h_r e λ , o modelo calcula um limiar d_{thresh} como na Equação 2-2.

$$d_{thresh} = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (2-2)$$

Se a distância d entre transmissor e receptor for menor que esse limiar, o modelo *two-ray ground* calcula a intensidade do sinal recebido como no modelo *free space*. Caso contrário, a componente refletida no solo começa a causar interferência destrutiva, e a intensidade do sinal passa a ser calculada como na Equação 2-3, onde $P_{r,TRG}$ é a intensidade do sinal no receptor e os demais parâmetros têm o mesmo significado adotado nas Equações 2-1 e 2-2. Assim como no modelo *free space*, o modelo *two-ray ground* assume que não existem obstáculos à propagação de sinal (exceto pela reflexão no solo).

$$P_{r,TRG} = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4}, \quad (2-3)$$

É possível observar que, tanto no modelo *free space* quanto no *two-ray ground* (Equações 2-1 e 2-3), a distância entre transmissor e receptor é o único parâmetro variável para determinar a intensidade de sinal no receptor. Conseqüentemente, segundo esses modelos, receptores equidistantes de um mesmo transmissor obterão dele sinais idênticos, independentemente da presença de obstáculos.

O modelo *shadowing* (RAP01), em contrapartida, acrescenta uma componente não-determinística ao cálculo da intensidade do sinal recebido por meio de uma variável aleatória (X). Essa variável tem distribuição normal, média zero e desvio padrão σ (Equação 2-4). O desvio padrão é determinado empiricamente, e normalmente assume valores entre três (quando há linha de visão entre transmissor e receptor) e doze (no caso de obstrução do sinal por prédios).

$$X(x) : \{x \in (-\infty, \infty) | P(x) = N(0, \sigma^2)\} \quad (2-4)$$

O modelo adota uma distância de referência d_0 e determina a intensidade de sinal $P_{r,FS}(d_0)$ que seria obtida pelo modelo *free space*. Dados esses valores e um expoente de atenuação β , a intensidade de sinal no modelo *shadowing* é calculada pela Equação 2-5.

$$P_{r,SH} = P_{r,FS}(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\beta} 10^X \quad (2-5)$$

O expoente β da Equação 2-5 também é determinado empiricamente, e tipicamente assume um valor entre 2 (para propagação em ambientes abertos) e 6 (na presença de obstáculos). De acordo com a Equação 2-5, a recepção de sinal é praticamente garantida se a curtas distâncias do transmissor (valores pequenos para d), quase impossíveis a distâncias muito grandes e imprevisíveis para distâncias intermediárias.

Apesar de a variável aleatória X introduzir uma componente não-determinística ao modelo de propagação, o modelo *shadowing* tem a importante limitação de que a intensidade do sinal não depende da direção em que o receptor se encontra. Assim, se dois receptores estiverem à mesma distância de um certo transmissor, o cálculo da intensidade de sinal recebido em cada um será feita com base em parâmetros *idênticos*, ainda que um dos receptores tenha linha de visão (*LoS* — *Line of Sight*) desobstruída com o transmissor e o outro não.

Experimentos baseados em medições (GON08, OTT09) mostram que obstáculos (tais como prédios, árvores e até mesmo outros veículos) causam impacto significativo no desempenho da transmissão sem fio. Quando há uma linha de visão desobstruída entre transmissor e receptor, o sinal sofre

Conjunto	β	σ
LoS	3,17	9,15
AtC	4,05	10,74
União	3,43	11,95

Tabela 2.1: Parâmetros do modelo de *shadowing* calculados em uma área urbana.

interferência apenas da reflexão em obstáculos próximos. Do contrário, a qualidade da comunicação será pior, pois dependerá principalmente de reflexão, difração e refração do sinal (ou seja, a propagação do sinal através dos obstáculos).

Os experimentos conduzidos em (GON08) empregaram uma interface de comunicação sem fio IEEE 802.11b e antenas de alto ganho para avaliar o desempenho de transmissões *unicast* diretas (ou seja, sem roteamento) entre dois veículos. Resultados muito diferentes foram obtidos para cenários urbanos e em campo aberto. Nos experimentos conduzidos em campo aberto, o alcance de comunicação atingiu cerca de $3km$ com uma vazão de dados (*throughput*) de aproximadamente $5,5Mbps$, enquanto que na área urbana o alcance em que a vazão supera o limiar de $1Mbps$ é de $350m$ quando os veículos se encontram em linha de visão e $120m$ caso contrário.

Tendo em vista a importância dos obstáculos na propagação do sinal em áreas urbanas, uma variante do modelo de *shadowing* é proposta em (OTT09). Ao contrário da versão original, o modelo alternativo usa parâmetros (β e σ) diferentes nas Equações 2-4 e 2-5 conforme transmissor e receptor estejam ou não em linha de visão. Com base em medições realizadas ao longo de várias horas (empregando interfaces IEEE 802.11b), os autores determinaram esses parâmetros para três conjuntos de amostras: um conjunto corresponde à transmissão exclusivamente em linha de visão (LoS — *Line of Sight*), outro conjunto referente aos experimentos conduzidos na ausência da linha de visão (AtC — *Around the Corner*) e, finalmente, um terceiro conjunto composto da união dos outros dois (União).

A Tabela 2.1 resume os valores obtidos para β e σ para os três conjuntos de amostras. É possível observar que o terceiro conjunto é aquele que possui o maior desvio padrão (σ) para a variável aleatória X (definida na Equação 2-4). Isso ocorre porque as amostras contidas nesse conjunto foram obtidas tanto com a existência de linha de visão quanto sem ela. Por outro lado, tanto os conjuntos LoS e AtC apresentam desvio padrão menor e expoentes de perda (β) consideravelmente diferentes. Segundo esses resultados, o modelo de *shadowing* original ($\beta = 3,43$ e $\sigma = 11,95$) produziria resultados piores do que os que seriam obtidos no mundo real para a comunicação em linha de visão (LoS:

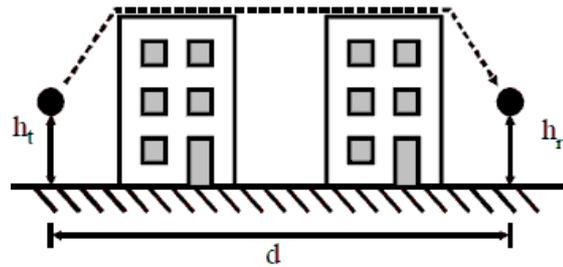


Figura 2.2: Propagação de sinal por difração sobre prédios.

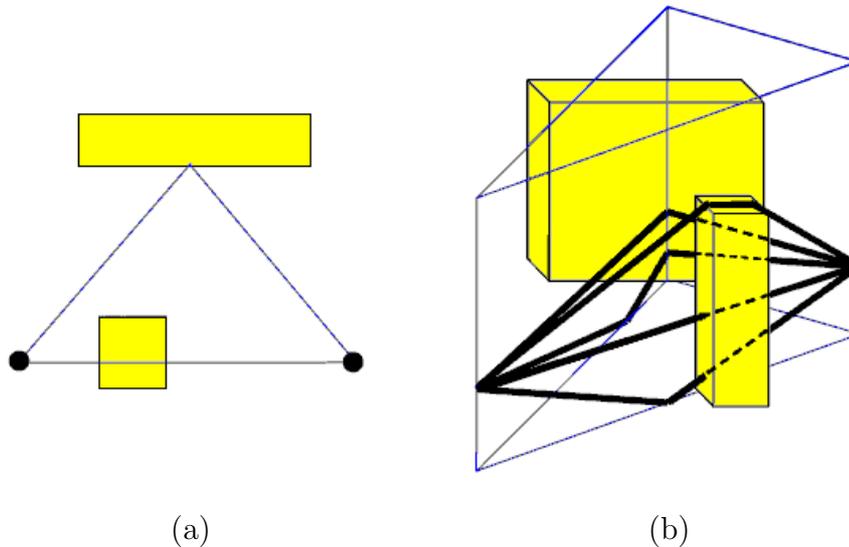


Figura 2.3: Exemplo do uso da técnica de *raytracing*.

$\beta = 3,17$ e $\sigma = 9,15$) e melhores dos que seriam conseguidos caso contrário (AtC: $\beta = 4,05$ e $\sigma = 10,74$).

O modelo de Walfisch-Ikegami (FLE96) também diferencia as transmissões conforme os nós envolvidos estejam ou não em linha de visão. O modelo se destina a áreas urbanas, e assume que a única forma de um sinal chegar a um receptor que não esteja em linha de visão com o transmissor seja por meio de difração sobre os prédios, como ilustra a Figura 2.2.

Modelos mais realistas também devem considerar reflexões e difrações nos cruzamentos. O modelo *UDeI* (SRI07) divide a área simulada em células de tamanho constante, e utiliza a técnica de *raytracing* (LIN89) para calcular uma *matriz de propagação*. Cada elemento (i, j) dessa matriz corresponde à atenuação que um sinal emitido por um transmissor na célula i sofreria ao chegar a um receptor na célula j .

Resumidamente, essa técnica consiste em determinar todos os caminhos pelos quais um sinal pode se propagar entre os pontos em questão. Esses caminhos são representados graficamente por raios, e incluem propagação direta (em linha de visão), reflexões no solo e obstáculos, difração e propagação

através de obstáculos, como ilustra a Figura 2.3.

Experimentos de simulação do modelo *UDel* produziram resultados próximos aos obtidos por medições em um cruzamento em um *campus* (SRI07). Outras publicações em que a técnica de *raytracing* produz resultados próximos aos obtidos por medição incluem (DEG01) e (ERC97). Todavia, o uso preciso dessa abordagem requer informações sobre a posição dos obstáculos e o material de que são feitos, além de ser um procedimento computacionalmente intenso (ISK02).

Tendo em vista o que foi discutido nesta seção, é possível concluir que sinais de rádio sofrem menor atenuação quando o receptor possui linha de visão desobstruída com o transmissor. Caso contrário, a degradação da qualidade do sinal é maior, diminuindo a probabilidade de sucesso na transmissão de pacotes. Esta tese adota um modelo simplificado, porém coerente com os resultados obtidos pelos modelos apresentados nesta seção, que é discutido na Seção 4.1.1.

2.2

Aplicações

Conforme mencionado no Capítulo 1, as aplicações para VANETs podem ser classificadas como sendo de segurança ou conveniência. As aplicações de segurança visam evitar acidentes e, por esse motivo, possuem requisitos de desempenho mais restritivos, tais como vazão e latência da comunicação (YIN04, JIA06, ROB06). Aplicações de conveniência, por outro lado, tem finalidades comerciais, de entretenimento e melhoria do tráfego de veículos, e seus requisitos de desempenho tendem a ser menos restritivos (BAI08).

Esta seção discute resumidamente as principais aplicações dessas duas categorias. Uma análise e classificação mais detalhadas das aplicações veiculares podem ser encontradas em (BAI08).

2.2.1

Aplicações de Segurança

A segurança de motoristas e passageiros tem sido preocupação constante do governo e da indústria automotiva. Com o advento da comunicação inter-veicular, novas tecnologias e aplicações se tornaram disponíveis para aumentar a segurança nas ruas e avenidas.

Uma dessas aplicações é o controle de cruzeiro cooperativo adaptativo (CACC — *Cooperative Adaptive Cruise Control*) (BRU04, HAL05). Os primeiros sistemas de controle de cruzeiro (CC — *Cruise Control*) se destinavam a manter o veículo em uma velocidade constante, selecionada pelo motorista. As principais vantagens desse sistema eram ajudar os motoristas a não excede-

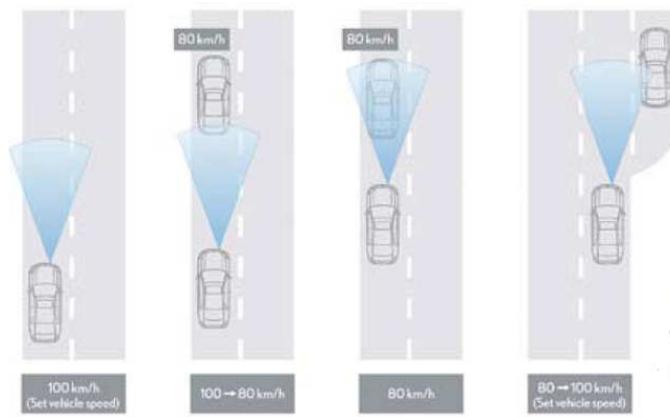


Figura 2.4: Uso do radar no controle de cruzeiro adaptativo.

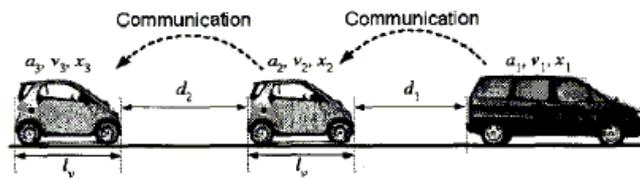


Figura 2.5: Controle de cruzeiro cooperativo agilizando a reação do veículo de trás.

rem o limite de velocidade das estradas e permitir que o veículo fosse conduzido com maior conforto, uma vez que o sistema torna desnecessário o acionamento contínuo do pedal do acelerador.

O controle de cruzeiro adaptativo (ACC — *Adaptive Cruise Control*), por sua vez, controla a velocidade do veículo em função do que se encontra imediatamente à frente, como ilustra a Figura 2.4 (TOY08). Por meio de radar, é possível detectar esse veículo e, se necessário, reduzir a velocidade a fim de evitar uma colisão. Outra possibilidade é a de que um veículo freie bruscamente, exigindo uma reação rápida dos seguintes. Nesse caso, cada veículo precisa detectar a aproximação súbita do veículo à frente para evitar um acidente.

A versão cooperativa do controle de cruzeiro usa comunicação inter-veicular para proporcionar aos motoristas um tempo de reação maior. Quando um motorista aciona os freios, esse evento pode ser detectado imediatamente por meio de sensores e transmitido aos demais veículos. O benefício é ainda maior no caso de vários veículos trafegarem próximos uns dos outros, como na Figura 2.5. Nessa situação, usando-se um sistema de controle de cruzeiro adaptativo não-cooperativo, uma freada do veículo *A* só seria detectada por *C* depois que *B* reagisse a ela. Conseqüentemente, a latência com que os veículos detectam a primeira freada é *cumulativa*. Com o uso de um sistema cooperativo, *C* seria notificado da freada de *A* antes que *B* reagisse,

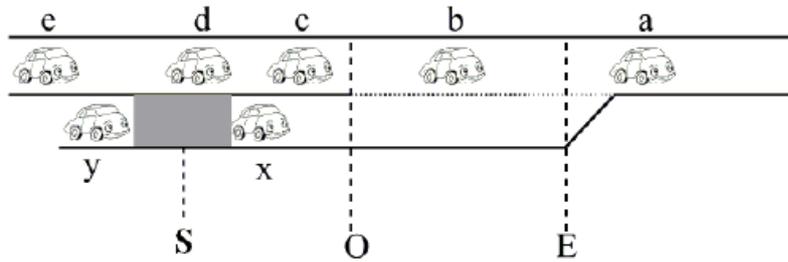


Figura 2.6: Mesclagem de fluxos de veículos em uma auto-estrada.

proporcionando-lhe mais tempo para desacelerar.

Outras aplicações na área de segurança incluem o aviso de avanço de semáforo (IVW — *Intersection Violation Warning*), aviso de veículo lento ou parado (SVA — *Stopped or Slow Vehicle Advisor*) e alerta de perigos na pista (RHCN — *Road Hazard Condition Notification*), a exemplo de um trecho de pista escorregadia (ROB06).

2.2.2

Aplicações de Conveniência

As aplicações de conveniência se destinam, principalmente, a tornar o tráfego veicular mais eficiente, entreter passageiros ou oferecer-lhes serviços de informações de diferentes naturezas. As destinadas à melhoria do tráfego veicular pertencem à categoria de sistemas de transporte inteligente (ITS — *Intelligent Transportation Systems*).

Uma aplicação tradicional nessa área é a mesclagem de fluxos veiculares (*ramp metering*) (WAN07). O objetivo dessa aplicação é o de coordenar a chegada de veículos ao entroncamento de estradas, de modo a aumentar a vazão no local. Dessa forma, evitam-se freadas bruscas e mudanças freqüentes de velocidade, proporcionando economia de combustível e redução na emissão de poluentes (WAN07).

Com o advento da comunicação inter-veicular e a disponibilidade de serviços de posicionamento, cada veículo pode disseminar sua posição, velocidade e aceleração de modo a permitir que a mesclagem seja feita de forma descentralizada, como no algoritmo proposto em (WAN07). O princípio de funcionamento do algoritmo é ilustrado na Figura 2.6, que mostra a junção de uma estrada de acesso a uma auto-estrada. Dadas as posições e velocidades de cada veículo (obtidas por *beacons* enviados periodicamente), o algoritmo estima o tempo que cada um demorará para chegar à junção (ponto *O*). Esses tempos são usados para determinar em que ordem os veículos devem passar pela junção. A seguir, a velocidade de cada veículo da estrada secundária é ajustada para que, após a mesclagem, exista uma distância mínima de segurança entre

cada veículo e o que se encontrar a sua frente.

Outro exemplo de aplicação na área de ITS são os sistemas de informação de tráfego (TIS — *Traffic Information Systems*). Esses sistemas disseminam informações sobre tráfego de veículos (como vazão ou velocidade) em várias ruas da cidade, a fim de que as mais congestionadas possam ser evitadas.

Os veículos equipados com um conjunto básico de sensores (tais como posição e velocidade) e uma interface de comunicação sem fio serão capazes de monitorar suas próprias velocidades e disseminá-las, possibilitando a implementação de sistemas de informação de tráfego em redes veiculares *ad hocs*. Um exemplo desses sistemas é o SOTIS (*Self-Organized Traffic Information System*) (WIS03), que divide as ruas em *segmentos* de tamanho conhecido e calcula a média das velocidades dos veículos em cada um deles. Esse valor é disseminado aos veículos situados nos outros *segmentos* por meio de um mecanismo de difusão adaptativa.

Resumidamente, esse mecanismo altera o período com que cada veículo dissemina a informação sobre a velocidade em um dado *segmento* de acordo com o tempo decorrido desde que a última informação sobre esse *segmento* foi recebida. Assim, se um veículo recebe duas mensagens sobre um mesmo *segmento* em um curto espaço de tempo, ele aumentará o período com que irá disseminar a informação sobre esse *segmento*. Outro critério utilizado para controlar o período de disseminação de dados é a diferença entre os valores contidos nas mensagens que um veículo recebe e a informação de que esse veículo já dispunha a respeito do *segmento* em questão, obtido das mensagens anteriores. Dessa forma, diferenças pequenas provocam o aumento do período de disseminação, e vice-versa.

A faceta complementar do problema do congestionamento veicular consiste em ajudar os motoristas que já estiverem presos no congestionamento a escaparem. Congestionamentos costumam se estender por centenas de metros, de modo que a fronteira da área congestionada normalmente se situa fora do alcance de visão dos motoristas. Por esse motivo, o serviço apresentado em (MEL06) propõe que cada veículo monitore sua própria velocidade a fim de detectar um congestionamento.

A partir de então, cada veículo dissemina periodicamente uma lista de vértices que compõem o perímetro da área congestionada. Essa lista contém, inicialmente, apenas a posição do veículo que a está transmitindo. Contudo, à medida que os veículos recebem as mensagens dos demais, o perímetro da área congestionada vai sendo determinado de forma cooperativa. Uma vez conhecidos os limites dessa região, os motoristas podem ser orientados a seguirem a rota mais curta para deixá-la.

2.3

Aplicação de VANETs Considerada

Conforme explicado ao longo deste capítulo, diferentes tipos de aplicações possuem requisitos distintos, ao mesmo tempo em que diversos fatores influenciam o desempenho das VANETs, tais como a velocidade dos veículos e a existência de obstáculos à propagação de sinal. Assim sendo, esta tese se concentra no roteamento *GeoUnicast* em ambientes urbanos, destinado a aplicações de conveniência, tais como jogos e bate-papo (*chat*).

Os algoritmos de roteamento propostos nesta tese assumem que o remetente e o destinatário de uma mensagem se encontram na mesma partição da rede, ou seja, que exista uma rota entre o remetente e o destinatário de uma mensagem. Essa hipótese se verifica para várias combinações de parâmetros de simulação, como discutido no Capítulo 5. Em redes mais esparsas, por outro lado, o uso de armazenamento temporário (*store and forward*) seria necessário. As modificações necessárias para que os algoritmos propostos implementem essa funcionalidade são objeto de trabalhos futuros.