

Deposição Gamma: Planejando a Infraestrutura de Comunicação para Redes Veiculares Assegurando Limites de Tempo "Entre-Contatos" de Veículos com a Infraestrutura

Cristiano M. Silva, Cristiano G. Pitangui, Daniel L. Guidoni, Fernanda H. S. Souza
Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ)
Minas Gerais
{cristiano,pitangui.cristiano,guidoni,fsumika}@ufsj.edu.br

João F. M. Sarubbi, Flávio V. C. Martins, Elizabeth Wanner
Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET)
Minas Gerais
{joao,flaviocruzeiro,efwanner}@decom.cefetmg.br

RESUMO

A Deposição Gamma é uma métrica de avaliação da qualidade da infraestrutura de comunicação apoiando a operação de redes veiculares, que leva em consideração dois parâmetros: a) o tempo entre contatos de veículos com a infraestrutura; b) a porcentagem de veículos que devem respeitar essas garantias de tempo. A Deposição Gamma pode ser usada pelo projetista de redes para definir de pontos de checagem ao longo da malha viária com o objetivo de capturar e disseminar informações de tráfego. Assim, o objetivo é distribuir as unidades de comunicação de forma que ρ por cento dos veículos passem por unidades de comunicação em intervalos não maiores que τ segundos. Esse trabalho formaliza a Deposição Gamma, apresenta um modelo de Programação Linear Inteira, bem como define uma heurística para aproximação da solução ótima. Os experimentos demonstram que a heurística incorre em baixo desvio quando consideram-se garantias de tempo entre contato com valores pequenos (alta frequência de contatos).

PALAVRAS CHAVE. Redes Veiculares, Planejamento de Infraestrutura, Métrica de Desempenho.

Área Principal: (1) TEL&SI -PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações ou (2) SIM - Simulação.

ABSTRACT

Gamma Deployment is a metric for evaluating the distribution of roadside units in vehicular networks in terms of two parameters: a) the inter-contact time between vehicles and the infrastructure; and, b) the share of vehicles that must respect the inter-contact time guarantees. We envision the use of the Gamma Deployment metric when the network designer intends to distribute check-points along the road network in order to collect and disseminate traffic information through roadside units. Thus, the goal is to locate the roadside units such that ρ percent of vehicles meet roadside units in time intervals less than τ seconds. In this work, we formalize the Gamma Deployment metric by developing an Integer Linear Programming formulation (ILP). We also develop a heuristic for approximating the optimal solution. Results demonstrate the heuristic incurring in small deviations for small inter-contact times (high frequency of contacts).

KEYWORDS. Vehicular Networks, Infrastructure Planning, Performance Metric.

Main Area: (1) TEL&SI -PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações ou (2) SIM - Simulação.

1. Introdução

A integração da comunicação sem fio com dispositivos inteligentes para a construção de Sistemas de Transportes Inteligentes (STI) aponta uma revolução na forma de gerir o tráfego e a mobilidade urbana como um todo. Veículos capazes de se comunicar se tornam sensores da mobilidade urbana, fornecendo informações para sistemas de decisão [Torres et al., 2015], colaboração [Smaldone et al., 2008] e gerenciamento de tráfego [Silva et al., 2015b]. Um dos desafios fundamentais para a ampla utilização desse tipo de sistema está no desenvolvimento de mecanismos de comunicação adequados ao cenário veicular. A grande mobilidade dos veículos, juntamente com a complexa topologia urbana, geram vários desafios para que a comunicação sem fio ocorra. Em áreas de grande tráfego, o canal de comunicação deve lidar com vários veículos tentando enviar e receber dados simultaneamente. Por outro lado, em áreas de baixo tráfego, a comunicação veículo-veículo enfrenta a escassez de pares comunicantes.

As aplicações propostas para o cenário veicular vêm evoluindo de aplicações simples de envio de recomendações de tráfego para aplicações complexas envolvendo transmissões de mídia em tempo real, colaboração, e até mesmo, jogos. Essa mudança de paradigma demanda a elaboração de novas estratégias para o planejamento e gerenciamento da rede veicular [Silva e Meira Jr, 2015]. Enquanto o desempenho de redes cabeadas é tipicamente medido através da latência de rede e largura de banda, tais medidas não se aplicam a redes móveis, afinal a latência e a largura de banda se tornam dependentes da localização de cada nó [Capone et al., 2007]. De forma similar, as métricas adotadas em redes celulares não parecem adequadas ao contexto das redes veiculares, visto que veículos não demandam cobertura contínua.

Embora os veículos possam se comunicar uns com os outros de forma *ad-hoc*, o desempenho da rede veicular pode ser amplamente melhorado a partir da implantação de um conjunto de pontos de acesso ao longo da malha rodoviária. Tais pontos de acesso são providos por unidades de comunicação¹ interconectadas por redes rápidas, o que permite a disseminação de informações de tráfego entre os motoristas e sistemas especializados responsáveis pela elaboração das recomendações [Gerla e Kleinrock, 2011]. Dado que essas unidades de comunicação tendem a servir como fontes primárias para a recepção e disseminação de dados de tráfego, é razoável assumir que o projetista da rede demandará estratégias que permitam a implantação dessas unidades de comunicação de forma que os veículos as contatem com uma dada frequência conhecida *a priori*.

Assim, parece intuitivo que a taxa de encontros entre veículos e unidades de comunicação impacta o desempenho da rede. Por outro lado, essa taxa de encontros, por si só, parece não ser capaz de qualificar amplamente a conectividade experimentada pelos veículos, afinal esses encontros podem ser mal distribuídos entre os veículos (alguns veículos cruzando unidades de comunicação com alta frequência, enquanto que outros veículos sem conexão alguma).

Ao invés de utilizar a taxa de encontros (como proposto em diversos trabalhos anteriores), esse trabalho propõe a utilização do tempo "entre contatos" como métrica para avaliação da qualidade da distribuição (*layout*) das unidades de comunicação ao longo da malha viária. Nesse sentido, propõe-se a métrica **Deposição² Gamma** (Γ_D) para avaliar o desempenho de redes veiculares infraestruturadas. Dada uma distribuição de unidades de comunicação, essa é considerada $\Gamma_D(\tau)$ quando garante-se que ρ por cento dos veículos encontram unidades de comunicação em intervalos de tempo não-maiores que τ segundos, considerando toda a sua viagem.

O presente trabalho formaliza a métrica **Deposição Gamma** e propõe dois métodos para resolver o problema de alocação de unidades de comunicação a fim de atender aos critérios da **Deposição Gamma**. O primeiro método usa Programação Linear Inteira para encontrar a distribuição

¹Esse trabalho utiliza a expressão "unidades de comunicação" para se referir ao termo "roadside units", cujo significado literal é "unidades de (comunicação) de beira de estrada".

²O termo "deposição" possui a conotação de implantação ou colocação (de infraestrutura de comunicação para redes veiculares). Assim, uma estratégia de deposição é aquela que identifica onde as unidades de comunicação devem ser implantadas na rede veicular.

ótima das unidades de comunicação. Dada a complexidade do problema, o modelo é capaz de solucionar apenas instâncias muito pequenas. Assim, também propõe-se a heurística *Gamma-g* capaz de encontrar uma solução num curto intervalo de tempo.

Resultados gerados a partir de um rastro de mobilidade realístico demonstram que a heurística *Gamma-g* fornece soluções próximas a ótima quando se pretende que veículo experimentem contatos frequentes com as unidades de comunicação. Como exemplo, quando considera-se um cenário onde o tempo "entre contatos" seja não superior que 40 segundos ($\tau = 40$), *Gamma-g* retorna uma solução que degrada em apenas 3,2% a solução ótima (em termos do número de unidades de comunicação demandadas). Além disso, 72% das unidades de comunicação alocadas por *Gamma-g* estão na mesma posição indicada pela solução ótima. No entanto, quando aumenta-se o limite de tempo "entre contatos" para $\tau = 120$ segundos, *Gamma-g* apresenta uma degradação de 14,7%, também em termos da quantidade de unidades de comunicação demandadas.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A seção 3 introduz a métrica *Deposição Gamma*. A seção 4 apresenta o modelo de Programação Linear Inteira para o problema de alocação de unidades de comunicação. A seção 5 propõe a heurística *Gamma-g*. A seção 6 apresenta os experimentos considerando vários cenários. Finalmente, a seção 7 conclui o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

A literatura apresenta várias estratégias para a alocação de unidades de comunicação em redes veiculares. A probabilidade de contato é considerada nos seguintes trabalhos. [Zheng et al., 2010] apresentam a avaliação da estratégia de implantação considerando a oportunidade de contato. A métrica mensura a fração da distância (ou tempo) que o veículo está em contato com a infraestrutura, enquanto que [Lee e Kim, 2010] propõem uma heurística gulosa que alocar a infraestrutura com o objetivo de melhorar a conectividade entre veículos, ao mesmo tempo em que se reduz suas desconexões, e cada interseção é considerada como uma potencial posição para uma unidade.

[Xie et al., 2013] abordam o problema de alocação de unidades de comunicação assumindo conhecimento prévio da trajetória de cada veículo. Baseando-se em dados históricos, os autores propõem um modelo probabilístico para inferir as localizações das unidades de comunicação. Já, [Chi et al., 2013] consideram uma estratégia que distribui as unidades de comunicação tão equilibradamente quanto possível. No entanto, os autores comparam seus resultados com uma estratégia de alocação aleatória, que incorre em um desempenho muito baixo. De forma complementar, [Liu et al., 2013] propõem uma estratégia de alocação de unidades de comunicação para a transferência de arquivos em redes veiculares modelando o encontro entre veículos e unidades de comunicação como uma cadeia da Markov homogênea de tempo contínuo.

Em termos de estratégias geométricas, [Cheng et al., 2013] propõem uma heurística para solucionar o problema da máxima cobertura. Já em termos de modelos de otimização, [Aslam et al., 2012] usam Programação Inteira Binária para o problema de alocação de infraestrutura. A partir da eliminação de vias secundárias, as vias principais são modeladas como uma grade (*grid*). [Wu et al., 2012] consideram um cenário de autoestrada com múltiplas pistas e múltiplos saltos.

[Trullols et al., 2010] e [Cataldi e Harri, 2011] propõem a modelagem de alocação de unidades de comunicação como um problema de máxima cobertura, assumindo-se a premissa de conhecimento prévio das trajetórias dos veículos. Essa premissa é relaxada nos trabalhos [Silva et al., 2015a,c], que propõem modelos de complexidades crescentes usando apenas a taxa de migração de veículos entre regiões da área urbana.

Diferentemente das abordagens anteriores, a estratégia proposta neste trabalho considera o tempo "entre contatos" para identificar os melhores locais para implantação das unidades de comunicação, permitindo o amplo sensoriamento do tráfego, bem como a elaboração de estratégias sofisticadas para entrega de conteúdos em redes veiculares.

3. Apresentação da Métrica *Deposição Gamma*

A *Deposição Gamma* é uma métrica proposta para avaliar a qualidade da distribuição de unidades de comunicação suportando redes veiculares, tendo como objetivo avaliar a regularidade sobre o número de contatos entre veículos e as unidades de comunicação, a partir de garantias do tempo “entre contatos”. Assim, qualquer veículo que atenda os critérios da *Deposição Gamma* deve experimentar (pelo menos) uma oportunidade de contato com unidades de comunicação em janelas não maiores que τ segundos durante toda a sua viagem. Dito de uma forma mais pragmática, quando um veículo inicia sua viagem, um cronômetro é iniciado, e o veículo possui τ segundos para encontrar a primeira unidade de comunicação. Quando o veículo sai do raio de cobertura dessa unidade de comunicação, ele recebe outros τ segundos para atingir a segunda unidade de comunicação, e assim por diante, até que o veículo termine sua viagem.

A regularidade em termos da quantidade de contatos entre veículos e unidades de comunicação endereça várias questões práticas. Ao garantir que um subconjunto dos veículos contate unidades de comunicação em intervalos de τ segundos, o administrador da rede monitora o fluxo do tráfego com um alto nível de assertividade, permitindo a detecção de incidentes de trânsito e a pronta resposta em termos de recomendações de tráfego. Além disso, quando se garante o tempo “entre contatos” para um subconjunto de veículos, facilita-se a atividade de distribuição de mídia. O subconjunto de veículos atendido pela *Deposição Gamma* pode agir como super-pares (*super-peers*), reproduzindo o conteúdo recebido das unidades de comunicação para veículos próximos, facilitando a disseminação de conteúdo na rede veicular.

Assim, uma determinada distribuição de unidades de comunicação é considerada $\Gamma_D(\tau, \rho)$ quando garante-se que ρ por cento dos veículos encontrem unidades de comunicação em intervalos de tempo não maiores que τ segundos durante toda a viagem. Formalmente:

Definição 1 (*Deposição Gamma*: $\Gamma_D(\tau, \rho)$). Seja M a representação de uma malha viária e $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ um conjunto de veículos viajando em M . Seja $C \subset V$ o conjunto de veículos que atravessa unidades de comunicação em intervalos não maiores que τ segundos. Essa rede veicular é considerada $\Gamma_D(\tau, \rho)$ quando $\frac{|C|}{|V|} \geq \rho$.

A *Deposição Gamma* possui duas dimensões: τ e ρ . O parâmetro τ indica a janela de tempo, ou seja, a frequência com a qual veículos devem encontrar unidades de comunicação. Uma redução no valor τ implica no aumento do número de unidades de comunicação necessárias para preservar a fração de ρ por cento dos veículos, afinal quanto menor o tempo “entre contatos”, maior a quantidade de ilhas de cobertura que devem estar presentes na malha viária. Uma característica interessante é o fato da métrica *Deposição Gamma* ser independente de tecnologia de comunicação.

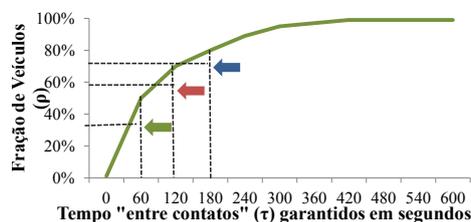


Figura 1: *Deposição Gamma* indica a relação entre τ e ρ .

Na *Deposição Gamma*, a caracterização da rede não é representada por um valor escalar, mas como uma curva em um espaço bidimensional, tal como exemplificado na figura 1. Basicamente, traça-se τ no eixo x , e ρ no eixo y . Repare que a seta verde indica que 50% dos veículos encontram unidades de comunicação em intervalos não maiores que 60 segundos. Assim, essa rede é considerada uma *Deposição* $\Gamma_D(60, 0.5)$. Já a seta vermelha indica que 70% dos veículos encontram unidades de comunicação em intervalos não maiores que 20 segundos, fazendo dessa rede também

uma Deposição $\Gamma_D \binom{120}{0.7}$. Finalmente, a seta azul indica que 80% dos veículos encontram unidades de comunicação em intervalos não maiores que 180 segundos, fazendo essa rede também ser uma Deposição $\Gamma_D \binom{180}{0.8}$. Note que representar *Gamma* como uma relação entre τ e ρ traz a vantagem de definir de maneira clara os limites de desempenho da rede veicular, permitindo a comparação de desempenho de diversas estratégias de alocação de infraestrutura sob diferentes topologias e fluxos.

4. Deposição Ótima de Unidades de Comunicação satisfazendo a Deposição *Gamma*

Esta seção apresenta uma formulação matemática para resolver, de forma ótima, o problema de alocação de unidades de comunicação a fim de satisfazer a *Deposição Gamma*. Antes de apresentar a formulação matemática, faz-se necessário uma breve discussão sobre a representação de malhas viárias utilizada ao longo desse trabalho. Malhas viárias podem assumir topologias muito complexas. Para superar tal adversidade, propõe-se o particionamento da área urbana em um conjunto de $\psi \times \psi$ células urbanas de mesmo tamanho³. Para atender às necessidades do projetista, as células urbanas podem ser de tamanhos arbitrários. Quando se exige maior/menor precisão, simplesmente aumenta-se/diminui-se o número de células urbanas cobrindo a malha viária, da mesma que aumentando-se a quantidade de *pixels*, também aumenta-se a resolução de uma imagem digital.

Particionando-se a malha viária, diminui-se o número de locais a serem avaliados pelas estratégias de alocação de unidades de comunicação, acarretando redução do esforço computacional. Sem perda de generalidade, assume-se que a célula urbana é inteiramente coberta pela alocação de uma unidade *lógica* de comunicação⁴, visto que sua localização física na célula urbana deve levar em conta vários outros aspectos práticos que transcendem o escopo desse trabalho (disponibilidade de pontos de energia elétrica, construções bloqueando sinais, interferências, etc.).

A *Deposição Gamma* pode ser descrita através de uma formulação matemática. Dado um conjunto de veículos V , uma área representada por um *grid* $C_{\psi \times \psi} = [c_{ij}]$, e os rastros (*trace*) dos veículos ao longo do tempo, pode-se criar um conjunto de dígrafos $G^v = (N^v, A^v)$ para delinear os movimentos possíveis de todos os veículos $v \in V$, tal que uma unidade de comunicação é encontrada a cada τ segundos.

A figura 2(a) mostra a trajetória na área de interesse de um único veículo, enquanto que o tempo na fronteira das células é apresentada na figura 2(b). Cada célula que um veículo cruza na área representa um nó em N^v . Dois nós artificiais denotados por s e t são adicionados a G^v para servirem de origem e destino do caminho de v . As arestas em A^v são permitidas se, e somente se, o tempo de transição entre os nós for menor ou igual a τ . Considere, então, que cada nó (célula) tem um tempo de entrada t_{in} e um tempo de saída t_{out} . O tempo de transição pode ser calculado como a diferença entre t_{in} do nó de destino e t_{out} de um nó anterior. Note que os nós s e t têm $t_{in}=t_{out}=0$ e $t_{in}=t_{out}=0$, respectivamente. Já a figura 2(c) mostra o dígrafo construído para o veículo da figura 2, com $\tau = 20$. Cada caminho viável de s a t mostra uma possível atribuição de unidades de comunicação no *grid* C atendendo τ .

Note que sempre haverá, ao menos, um caminho possível. Isto é, no pior caso, as unidades de comunicação serão alocadas em cada célula atravessada pelo veículo. A solução ótima que satisfaz a *Deposição Gamma*, considerando-se um único veículo, é encontrada resolvendo-se o problema do caminho mais curto de s a t em G^v com custos unitários em todas as arestas de A^v . O número de unidades de comunicação é igual ao número de nós no caminho (desconsiderando s e t). No entanto, encontrar a melhor deposição que satisfaça os critérios da Γ_D para um conjunto de veículos, exige a resolução de um problema de fluxo de múltiplas mercadorias *multi-commodity* de tal forma que o fluxo só é permitido através de nós que possuam unidades de comunicação.

A *Deposição Gamma* é modelada como segue. Considere $\delta^+(i)$ e $\delta^-(i)$, respectivamente, como os conjuntos de vizinhos de entrada e saída de do nó i . Considere as variáveis de decisão:

³Cada célula da grade é chamada de célula urbana.

⁴Unidade lógica de comunicação é aquela capaz de cobrir completamente a célula urbana.

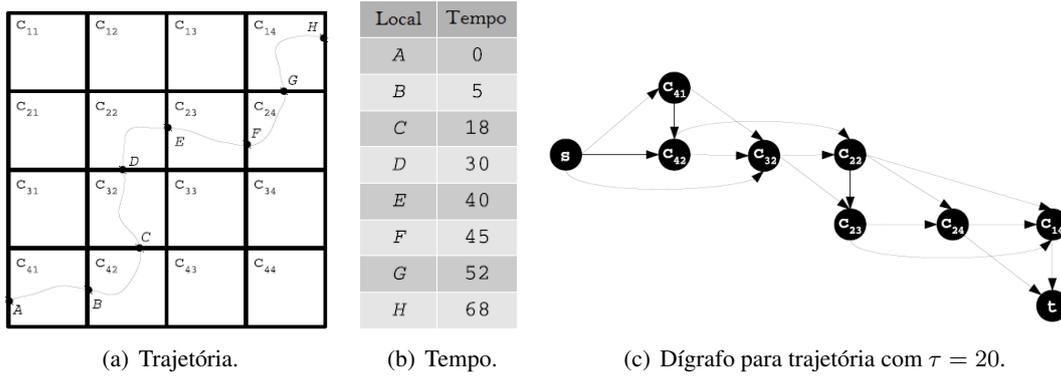


Figura 2: Trajeto hipotético de um veículo.

- $c_{ij} \in \{0, 1\}$: indica se uma unidade de comunicação é alocada na célula $[i, j]$ ou não.
- $z^v \in \{0, 1\}$: indica se o veículo v é coberto ou não.
- $f_{kl}^v \in \mathbb{R}$: indica se a aresta $[k, l]$ pertence ao caminho que contém unidades de comunicação do veículo v .

$$Min \left[\sum_{i=1}^{\psi} \sum_{j=1}^{\psi} c_{ij} \right] \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{k \in \delta^+(s)} f_{sk}^v = z^v \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{k \in \delta^-(t)} f_{kt}^v = z^v \quad \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{k \in \delta^-(l)} f_{kl}^v - \sum_{m \in \delta^+(l)} f_{lm}^v = 0 \quad \forall v \in V, \forall l \in N^v \setminus \{s, t\} \quad (4)$$

$$f_{kl}^v \leq c_{ij} \quad \forall v \in V, k \in N^v | k = c_{ij} \quad (5)$$

$$f_{kl}^v \leq c_{ij} \quad \forall v \in V, l \in N^v | l = c_{ij} \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V} z^v \geq \rho |V| \quad (7)$$

A função objetivo (1) minimiza o número de unidades de comunicação para satisfazer Γ_D . A restrição (2) garante um caminho que começa no nó $s \in N^v$ para cada veículo coberto $v \in V$. Da mesma forma, a restrição (3) garante um caminho que termina no nó $t \in N^v$ para cada veículo coberto $v \in V$. A restrição (4) garante a conservação de fluxo para todos os nós de transbordo no caminho do veículo $v \in V$. Restrições (5) e (6) asseguram que o fluxo pode cruzar os nós se, e somente se, eles possuem unidades de comunicação. Por sua vez, a restrição (7) garante a cobertura de ρ por cento dos veículos. A formulação (1)-(7) pode ser resolvida através de Programação Linear Inteira. No entanto, o algoritmo *branch-and-bound* baseado em (1)-(7) tem complexidade exponencial. Assim, propõe-se uma heurística para superar esse problema.

5. *Gamma-g*: Heurística para a Alocação de Unidades de Comunicação

Visto que a formulação (1)-(7) não é capaz de solucionar instâncias muito grandes num tempo computacional viável, essa seção apresenta uma heurística para encontrar uma solução aproximada para a alocação das unidades de comunicação na área urbana, de forma a se atingir uma *Deposição Gamma*. A estratégia recebe como entrada: i) fluxo de veículos; ii) τ (tempo máximo "entre contatos"); iii) ρ (porcentagem de veículos que devem possuir tempo "entre contatos" não maior que τ segundos). Como saída, o algoritmo indica o número necessário de unidades de comunicação, e também sua localização na malha viária. A dificuldade para planejar a infraestrutura de comunicação de forma a se atingir uma dada *Deposição Gamma* está intrinsecamente relacionada à mobilidade dos veículos. Por outro lado, a capacidade de resolver tal problema permite assertividade no planejamento da infraestrutura de comunicação necessária para a implantação de redes veiculares. A estratégia *Gamma-g* para se atingir uma *Deposição* $\Gamma_D(\tau)$ é composta por três etapas e detalhadas a seguir.

1. **Deposição preliminar:** etapa realiza uma deposição inicial de unidades de comunicação através de uma estratégia gulosa até satisfazer o critério $\Gamma_D(\tau)$;
2. **Busca local:** após a construção da solução inicial na etapa 1, as unidades de comunicação são movimentadas em sua vizinhança buscando-se maximizar o número de veículos cobertos (busca por máximo local). O número de unidades de comunicação empregadas permanece o mesmo, no entanto, a quantidade de veículos experimentando tempos "entre contatos" não maiores que τ segundos pode aumentar acima do limite ρ estabelecido;
3. **Remoção de unidades de comunicação redundantes:** uma vez que a busca local fez mais de ρ por cento dos veículos "cobertos", esse passo remove as unidades de comunicação em excesso até que se atinja o objetivo de ρ por cento dos veículos experimentando tempos "entre contatos" não maiores que τ .

5.1. Etapa 1: Deposição Preliminar

Utiliza-se uma heurística gulosa para a geração de uma solução inicial que rastreia os veículos de forma independente com o objetivo de identificar as células urbanas candidatas a receberem unidades de comunicação. A heurística inicia selecionando o primeiro veículo. Enquanto esse veículo não encontra uma unidade de comunicação, e seu tempo sem encontrar unidades de comunicação é menor que τ , as células urbanas atravessadas pelo veículo são armazenadas no conjunto temporário T . Caso esse veículo cruze uma unidade de comunicação antes de atingir o limite τ , o conjunto temporário T é limpo, e o temporizador do veículo é zerado.

Por outro lado, caso o veículo atinja o limite de τ segundos sem atravessar nenhuma ilha de cobertura, todas as células urbanas armazenadas em T são consideradas candidatas a receberem unidades de comunicação, e o placar (*score*) de cada uma dessas células é incrementado. Após isso, o conjunto T é limpo. Após repetir esse processo para todos os veículos, seleciona-se a célula urbana de maior placar para receber uma unidade de comunicação. Então, verifica-se se a fração de ρ por cento dos veículos tendo tempo "entre contatos" não maiores que τ segundos foi atingida. Em caso negativo, repete-se todo esse processamento para todos os veículos iterativamente para alocar uma nova unidade de comunicação, até que a fração ρ de veículos seja atingida.

O algoritmo 1 formaliza essa heurística. Recebe-se como entrada, a malha rodoviária particionada (M), o conjunto de veículos (V) juntamente com suas trajetórias, o limite de tempo "entre contatos" (τ), e a fração de veículos (ρ) que devem atender ao critério τ . A heurística retorna o subconjunto de células urbanas ($\Upsilon \subseteq M$) que devem receber unidades de comunicação.

Algoritmo 1 *Gamma-g*: Deposição Preliminar de Unidades de Comunicação.

Entrada: M, V, τ, ρ ;

Saída: Υ

```

1:  $\Upsilon \leftarrow \emptyset$ 
2: Repita
3:   Para todo ( $v \in V$ ) Faça
4:     tempo  $\leftarrow 0$ ;
5:      $T \leftarrow \emptyset$ ;
6:     Enquanto  $v.possuiPróximaCélulaUrbana()$  Faça
7:        $u \leftarrow v.retornaPróximaCélulaUrbana()$ ;
8:        $T \leftarrow u$ ;
9:       tempo  $\leftarrow$  tempo +  $v.retornaTempoNaCélulaUrbana(u)$ ;
10:      Se ( $\Upsilon.possuiRSU(u)$ ) Então
11:         $T \leftarrow \emptyset$ ;
12:        tempo  $\leftarrow 0$ ;
13:      Senão Se (tempo  $\geq \tau$ ) Então
14:        Para todo ( $t \in T$ ) Faça
15:           $M.incrementeScore(t)$ ;
16:        Fim Para
17:         $T \leftarrow \emptyset$ ;
18:      Fim Se
19:    Fim Enquanto
20:  Fim Para
21:   $\Upsilon \leftarrow M.retornaScoreMáximo()$ ;
22:   $M.limpaScore()$ ;
23: Enquanto ( $computeVeículosCobertos(M, V, \Upsilon, \tau) < \tau$ );
24: Retorne  $\Upsilon$ ;
```

▷ Localizações recebendo RSUs.
 ▷ Conjunto de soluções.
 ▷ Tempo sem RSU.
 ▷ Conjunto temporário de células urbanas cruzadas.
 ▷ Mais alguma célula urbana para o veículo?
 ▷ Pega a célula urbana.
 ▷ Adiciona a célula urbana ao conjunto temporário.
 ▷ Tempo gasto na célula urbana.
 ▷ Verifica se a célula urbana possui uma RSU.
 ▷ Reinicializa o conjunto temporário de células urbanas.
 ▷ Reinicializa o tempo sem encontrar uma RSU.
 ▷ Tempo sem RSU expirado.
 ▷ Incrementa *score* para células.
 ▷ Reinicializa o conjunto temporário.
 ▷ Adiciona RSU.
 ▷ Limpa o *score* de M.

5.2. Etapa 2: Busca Local

Após encontrar uma solução candidata (Υ), realiza-se uma busca local (subida de encosta) a fim de se encontrar um ótimo local (ponto em que nenhuma alteração na posição das unidades de comunicação leve a melhores soluções). De forma geral, toda busca local modifica uma solução atual para geração de soluções vizinhas. Na prática, a busca local proposta executa os seguintes passos: (i) seleciona a primeira unidade de comunicação de Υ ; (ii) move a unidade selecionada para uma das oito células vizinhas (norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste, sudoeste).

Em seguida, escolhe-se a direção que resulta na maior quantidade de veículos satisfazendo o critério de tempo "entre contatos" τ . No caso dessa posição existir, a unidade de comunicação é movida para tal célula vizinha. Repete-se, então, o mesmo processo para a essa mesma unidade de comunicação enquanto for possível encontrar uma solução melhor ou igual à solução atual. Quando não é mais possível obter ganhos movimentando-se essa unidade de comunicação pela sua vizinhança, parte-se para a segunda unidade de comunicação armazenada em Υ , e assim por diante.

O algoritmo 2 formaliza o procedimento de busca local. Ele recebe como entrada, a malha rodoviária particionada (M), a trajetória de cada veículo (V), o limite de tempo "entre contatos" (τ), a fração de veículos (ρ), a solução inicial obtida na etapa 1 (Υ), e o número máximo de iterações que é usado para quebrar ciclos, que ocorrem quando células vizinhas incorrem no mesmo número de veículos cobertos. A busca local retorna Υ' , a solução modificada, criada após a execução do algoritmo de subida de encosta. Após a execução da busca local, têm-se, potencialmente, uma solução que cobre mais do que ρ veículos satisfazendo o tempo "entre contatos" τ . Note que a busca local não altera a quantidade de unidades de comunicação.

5.3. Etapa 3: Ajuste do Conjunto Solução

A etapa 1 utiliza uma estratégia gulosa para alocar as unidades de comunicação de modo a satisfazer o critério de implantação $\Gamma_D(\tau)$. A etapa 2 realiza uma busca local para chegar a um ótimo local. A otimização acaba resultando numa fração de veículos superior à ρ sendo cobertos. Assim, a etapa 3 remove unidades de comunicação em excesso, de forma que apenas a fração ρ de veículos seja coberta. Tal como a etapa 2, aqui se utiliza um algoritmo guloso. Basicamente, calcula-se o número de veículos que necessita de cada unidade de comunicação (veículos que na

Algoritmo 2 Busca Local *Gamma-g*

Entrada: $M, V, \tau, \rho, \Upsilon, limiteIter$;

Saída: Υ'

```

1:  $\Upsilon' \leftarrow \Upsilon$ 
2:  $coberturaAtual = \text{calculeVeiculosCobertos}(M, V, \Upsilon', \tau)$ ;
3: Para todo ( $v \in \Upsilon'$ ) Faça
4:    $iter = 0$ ;
5:   Enquanto ( $iter < limiteIter$ ) Faça
6:     Para  $dir \leftarrow 1$  até 8 Faça ▷ Cada uma das 8 possíveis direções.
7:       mova  $v$  para a localização  $dir$ ;
8:        $c[dir] = \text{calculeVeiculosCobertos}(M, V, \Upsilon', \tau)$ ;
9:     Fim Para
10:    retorne  $v$  para a localização original.
11:     $posicaoDaMelhorCobertura = c.\text{retornePosicaoMaxima}()$ ;
12:    Se ( $c[posicaoDaMelhorCobertura] \geq atualCobertura$ ) Então
13:      mova  $v$  para localização  $posicaoDaMelhorCobertura$ ;
14:       $iter = 0$ ;
15:    Senão
16:       $iter = iter + 1$ ;
17:    Fim Se
18:  Fim Enquanto
19: Fim Para
20: Retorne  $\Upsilon'$ ;
```

ausência dessa unidade de comunicação não atingiriam o critério τ) e, então, remove-se a unidade que impacta no menor número de veículos cobertos. Esse processo é repetido enquanto a fração de veículos que satisfaz o critério τ seja maior que ρ . O algoritmo 3 formaliza o processo de ajuste do conjunto solução.

Algoritmo 3 *Gamma-g*: Ajuste do Conjunto Solução.

Entrada: $M, V, \tau, \rho, \Upsilon'$;

Saída: Υ''

```

1:  $\Upsilon'' \leftarrow \Upsilon'$ 
2: Enquanto ( $\text{veiculosCobertos} > \rho$ ) Faça
3:   remova de  $\Upsilon''$  a RSU que resulta em um menor impacto no número de veículos que não satisfazem o critério  $\tau$ ;
4: Fim Enquanto
5: Retorne  $\Upsilon''$ ;
```

6. Experimentos: Comparando *Gamma-g* com a Solução Ótima

Esta seção compara a heurística *Gamma-g* em relação à solução ótima usando o rastro (*trace*) realístico de mobilidade da cidade de Colônia⁵ (Alemanha), que possui 75.515 veículos. Apresenta-se um estudo comparativo considerando apenas os 100 veículos iniciais do traço de mobilidade por restrições do tempo de computação inerentes ao modelo. São estudados cenários considerando a fração de veículos $\rho=100\%$ e o tempo "entre contatos" $\tau=\{40,80,120\}$ segundos. Ao se analisar a qualidade de uma deposição de unidades de comunicação, duas medidas requerem maior atenção: a) investimentos; b) cobertura. Os investimentos são estimados através da análise do número de unidades de comunicação requeridas por cada estratégia de deposição, enquanto que a cobertura é analisada utilizando-se métricas de desempenho da rede.

6.1. Distribuição (*layout*) das Unidades de Comunicação

A Fig. 3(a), apresenta as rotas dos 100 veículos. A Fig. 3(b), apresenta a deposição ótima de unidades de comunicação, a fim de satisfazer a Deposição $\Gamma_D \binom{40}{1.0}$ (470 RSUs), enquanto a Fig. 3(c) apresenta a deposição de unidades de comunicação proposta pela *Gamma-g* (485 RSUs). A comparação detalhada entre a distribuição (*layout*) ótima e a distribuição proposta pela *Gamma-g*, mostra que 338 unidades de comunicação (72%) de *Gamma-g* estão no mesmo local que as unidades da solução ótima, e que apenas 132 unidades (28%) estão em posições diferentes da solução ótima.

⁵Disponível em: <http://kolntrace.project.citi-lab.fr/>

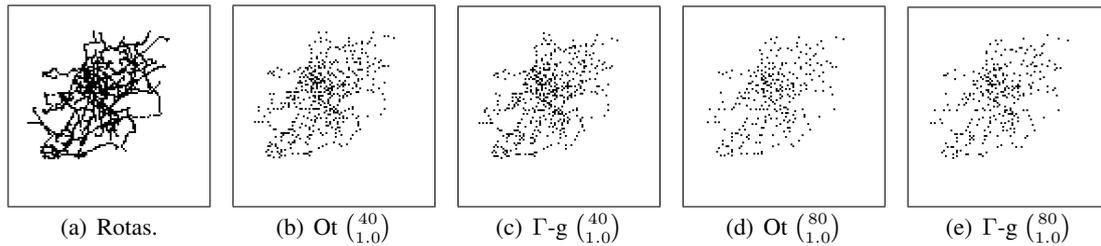
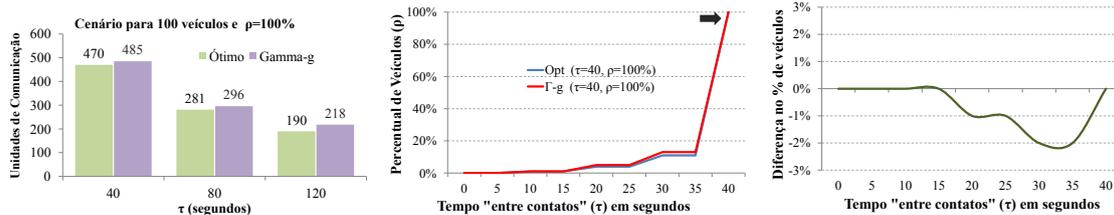


Figura 3: Fig. (a) apresenta as rotas dos veículos considerados. Figs. (b,d) apresentam a distribuição das unidades da solução Ótima. Figs. (c,e) apresentam a distribuição das unidades por *Gamma-g*.

Finalmente, nota-se que *Gamma-g* exige 15 unidades a mais para compensar aquelas que não estão nos locais "ótimos".

6.2. Número de Unidades de Comunicação

A Fig. 4(a) compara o número ótimo de unidades de comunicação ao número de unidades demandado pela *Gamma-g*. Quando aumenta-se τ , a diferença entre *Gamma-g* e a solução ótima também aumenta. Ao considerar $\tau=40$ segundos, *Gamma-g* requer 3,2% mais unidades que a solução ótima. Quando $\tau=80$, a diferença aumenta para 5,3%, e para $\tau=120$, a diferença chega a 14,7%.



(a) Quantidade de Unidades de Comunicação ($\rho=100\%$). (b) *Deposição Gamma* para $\tau=40$. (c) *Deposição Gamma Dif.* para $\tau=40$.

Figura 4: Fig.(a) apresenta o número de unidades de comunicação exigidas por cada estratégia. Fig.(b) compara a solução Ótima com *Gamma-g* em relação a métrica *Deposição Gamma* para $\tau=40$ segundos. Fig.(c) apresenta a *Deposição Gamma Diferencial* para $\tau=40$.

6.3. Desempenho da Rede

Esta seção compara o desempenho das redes veiculares geradas pela heurística *Gamma-g* e pela alocação ótima. A figura 4(b) apresenta a deposição ótima (em azul) e *Gamma-g* (em vermelho). O eixo x indica τ (segundos), enquanto que o eixo y indica ρ (fração de veículos). Dito de outra forma, a figura apresenta a porcentagem de veículos de acordo com o tempo "entre contatos" experimentado. Percebe-se que ambas as curvas ficam sobrepostas durante a maior parte do gráfico, o que indica um desempenho similar de ambas as estratégias. A seta preta indica o ponto ($x = 40, y = 1,0$). Já que tanto a curva vermelha e azul são as soluções para a *Deposição* $\Gamma_D(40/1.0)$, ambas devem alcançar $\tau=40$ and $\rho=100\%$.

De forma a realçar a diferença de desempenho entre as estratégias, pode-se construir um gráfico apresentando apenas sua diferença em termos da fração de veículos atingida (ρ). Esse resultado é apresentado na figura 4(c). No eixo x , nota-se que, para $0 \leq \tau < 15$, ambas as estratégias apresentam o mesmo número de veículos (ρ no eixo y) experimentando as mesmas garantias de tempo "entre contatos" (τ). No eixo x , quando $15 \leq \tau < 40$, *Gamma-g* apresenta mais veículos (até 2%) com as garantias de tempo "entre contatos" dadas pelo eixo y . Quando $\tau=40$, ambas

as estratégias asseguram 100% dos veículos com garantias de tempo "entre contatos" para $\tau=40$ segundos. *Gamma-g* fornece, para alguns valores de τ , cobertura levemente melhor que a solução ótima. De fato, já que *Gamma-g* utiliza mais unidades de comunicação, ela é capaz de garantir tempos "entre contatos" menores para um subconjunto de veículos, justamente devido a estas unidades redundantes.

7. Conclusão

Este trabalho modela a *Deposição Gamma* (Γ_D) como um problema de Programação Linear Inteira. A *Deposição Gamma* é uma estratégia que avalia a qualidade fornecida pela a infraestrutura de suporte a redes veiculares em termos do tempo "entre contatos". De forma geral, quando pretende-se que uma fração de ρ veículos contatem unidades de comunicação implantadas na rede em janelas de tempo não maiores que τ segundos durante todo o tempo de viagem do veículo, diz-se que busca-se uma *Deposição* $\Gamma_D(\tau)$. Assim, a *Deposição Gamma* garante que uma determina fração de veículos mantenha contatos frequentes com as unidades de comunicação, permitindo a recepção e disseminação de mensagens para aplicações que dão suporte aos Sistemas Inteligentes de Transportes. Como o modelo de Programação Linear Inteira não demonstrou-se capaz de solucionar grandes instâncias, o trabalho também apresenta a heurística *Gamma-g*, que encontra soluções aproximadas para a *Deposição Gamma*. Ao comparar as soluções para pequenas instâncias compostas por apenas 100 veículos, constata-se que a heurística apresenta pouco acréscimo de unidades de comunicação quando o tempo "entre contatos" é pequeno ($\rho=40$ segundos). Quando esse tempo aumenta, a heurística passa a demandar, proporcionalmente, mais unidades de comunicação que a solução ótima.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, CNPq, FAPEMIG, e PROPE/UFSJ.

Referências

- Aslam, B., Amjad, F., e Zou, C. (2012). Optimal roadside units placement in urban areas for vehicular networks. In *Computers and Communications (ISCC), 2012 IEEE Symposium on*, p. 000423–000429. IEEE.
- Capone, A., Cesana, M., Napoli, S., e Pollastro, A. (2007). Mobimesh: a complete solution for wireless mesh networking. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on*, p. 1–3.
- Cataldi, P. e Harri, J. (2011). User/operator utility-based infrastructure deployment strategies for vehicular networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, p. 1–5.
- Cheng, H., Fei, X., Boukerche, A., Mammeri, A., e Almula, M. (2013). A geometry-based coverage strategy over urban vanets. In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, & Ubiquitous Networks, PE-WASUN '13*, p. 121–128, New York, NY, USA. ACM. ISBN 978-1-4503-2360-4. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2507248.2507250>.
- Chi, J., Jo, Y., Park, H., e Park, S. (2013). Intersection-priority based optimal rsu allocation for vanet. In *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2013 Fifth International Conference on*, p. 350–355.
- Gerla, M. e Kleinrock, L. (2011). Vehicular networks and the future of the mobile internet. *Computer Networks*, 55(2):457 – 469. ISSN 1389-1286. Wireless for the Future Internet.
- Lee, J. e Kim, C. (2010). A roadside unit placement scheme for vehicular telematics networks. In Kim, T.-h. e Adeli, H., editors, *Advances in Computer Science and Information Technology*, vo-

- lume 6059 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 196–202. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-13576-7. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-13577-4_17.
- Liu, Y., Niu, J., Ma, J., e Wang, W. (2013). File downloading oriented roadside units deployment for vehicular networks. *Journal of Systems Architecture*, 59(10, Part B):938 – 946. ISSN 1383-7621. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762113000568>. Advanced Smart Vehicular Communication System and Applications.
- Silva, C. M., Andre L. L. Aquino, e Wagner Meira Jr (2015a). Deployment of roadside units based on partial mobility information. *Computer Communications*, 60(0):28 – 39. ISSN 0140-3664. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366415000493>.
- Silva, C. M., Aquino, A. L. L., e Meira Jr, W. (2015b). Smart Traffic Light for Low Traffic Conditions. *Mobile Networks and Applications*, p. 1–9. ISSN 1383-469X. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11036-015-0571-x>.
- Silva, C. M. e Meira Jr, W. (2015). Managing Infrastructure-Based Vehicular Networks. In *Mobile Data Management (MDM), 2015 16th IEEE International Conference on*, volume 2, p. 19–22.
- Silva, C. M., Wagner Meira Jr, e Joao F. M. Sarubbi (2015c). Non-Intrusive Planning of Roadside Infrastructure for Vehicular Networks Without Tracking Individual Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, -(–):–.
- Smaldone, S., Han, L., Shankar, P., e Iftode, L. (2008). Roadspcak: enabling voice chat on roadways using vehicular social networks. In *Proceedings of the 1st Workshop on Social Network Systems*, p. 43–48. ACM.
- Torres, A., Calafate, C. T., Cano, J.-C., Manzoni, P., e Ji, Y. (2015). Evaluation of flooding schemes for real-time video transmission in vanets. *Ad Hoc Networks*, 24, Part B(0):3 – 20. ISSN 1570-8705. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870514001620>. Modeling and Performance Evaluation of Wireless Ad-Hoc Networks.
- Trullols, O., Fiore, M., Casetti, C., Chiasserini, C., e Ordinas, J. B. (2010). Planning roadside infrastructure for information dissemination in intelligent transportation systems. *Computer Communications*, 33(4):432 – 442. ISSN 0140-3664. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366409003223>.
- Wu, T.-J., Liao, W., e Chang, C.-J. (2012). A cost-effective strategy for road-side unit placement in vehicular networks. *Communications, IEEE Transactions on*, 60(8):2295–2303. ISSN 0090-6778.
- Xie, B., Xia, G., Chen, Y., e Xu, M. (2013). Roadside infrastructure placement for information dissemination in urban its based on a probabilistic model. In *Network and Parallel Computing*, volume 8147 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 322–331. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-40819-9.
- Zheng, Z., Lu, Z., Sinha, P., e Kumar, S. (2010). Maximizing the contact opportunity for vehicular internet access. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, p. 1–9.