



## Uma Estratégia Baseada na Metaheurística GRASP para o Posicionamento de RSUs em Redes Veiculares Híbridas com Comunicação Síncrona

Taís Rocha Silva, João Fernando M. Sarubbi, Flavio V. Cruzeiro Martins

Departamento de Computação – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
Belo Horizonte – MG – Brazil

silva.taisrocha@gmail.com, joao@decom.cefetmg.br,  
flaviocruzeiro@decom.cefetmg.br

### RESUMO

Neste trabalho, é proposto um novo algoritmo baseado na metaheurística GRASP, denominado  $\Delta_r GRASP2_{SH}$ , para solucionar o problema de posicionamento de unidades de infraestrutura rodoviária (RSUs) em uma rede veicular híbrida com transmissão de um único salto e com comunicação síncrona. Uma rede veicular com arquitetura híbrida permite estabelecer a comunicação entre unidades de infraestrutura e veículos, bem como comunicações entre veículos. O objetivo consiste em encontrar uma quantidade mínima de RSUs que atenda aos requisitos de qualidade de serviço especificados pela Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ , almejando minimizar o custo total com a instalação e manutenção das unidades de infraestrutura. A Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  é uma métrica empregada na avaliação da qualidade de serviço oferecida em redes veiculares *ad hoc*. O algoritmo desenvolvido foi testado sob diferentes valores de alcance da comunicação entre veículos, com o intuito de comparar a influência exercida por tais valores, em relação ao número de RSUs empregado.

**PALAVRAS CHAVE.** VANETs, Comunicação híbrida, Metaheurística GRASP.

### ABSTRACT

In this work, we propose a new GRASP-based heuristic, called  $\Delta_r GRASP2_{SH}$ , for solving the allocation of roadside units (RSUs) in a vehicular network with single-hop transmission and synchronous communication. A vehicular network with hybrid architecture enables the infrastructure-to-vehicle communication, as well as the vehicle-to-vehicle communication. Our goal is to find a minimum set of RSUs to meet the quality of service requirements specified by the Deployment  $\Delta_{\rho_2}^{rho_1}$ , aiming to minimize the total cost of installation and maintenance of the infrastructure units. The Deployment  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  is a metric employed in the evaluation of the quality of service offered in vehicular networks. We test  $\Delta_r GRASP2_{SH}$  under several communication ranges to analyse the influence exerted by these ranges on the number of RSUs employed.

**KEYWORDS.** VANETs. Hybrid communication. GRASP metaheuristic.



## 1. Introdução

A sociedade moderna encontra-se em um contexto de convergência tecnológica, o que envolve uma necessidade progressiva e incessante por conectividade. Além disso, atualmente, a mobilidade urbana representa um dos maiores desafios de gestão enfrentados por autoridades dos grandes centros em todo o mundo. Tais questões, apesar de supostamente distintas, podem ser igualmente abordadas através de um Sistema de Transporte Inteligente (STI), idealizado para melhorar a eficiência e a segurança dos sistemas de transporte [Papadimitratos et al., 2007], bem como oferecer uma viagem mais agradável aos usuários ao propiciar o acesso a recursos tecnológicos [Ku et al., 2014]. O desenvolvimento de projetos na área de STI deve-se, principalmente, ao avanço de uma categoria de redes móveis *ad hoc* cujos nós são unidades de infraestrutura rodoviária (RSUs, do inglês *roadside units*), além de veículos equipados com sensores de bordo e módulos de comunicação sem fio [Papadimitratos et al., 2007; He et al., 2008; Liang et al., 2012]. Essa categoria de rede é comumente designada como VANET (acrônimo de *vehicular ad hoc network*).

Originalmente, uma rede veicular *ad hoc* referia-se exclusivamente aos sistemas de comunicação entre veículos, incluindo transmissões de um único ou de múltiplos saltos, mas sem a contribuição de qualquer infraestrutura rodoviária [Sichitiu e Kihl, 2008]. Em contrapartida, essa arquitetura não satisfazia às necessidades de comunicação em cenários com baixo tráfego, transmissão de longo alcance ou alta mobilidade de veículos, levando a frequentes desconexões na rede. Diante disso, viu-se a necessidade da instalação de unidades de infraestrutura fixas ao longo de rodovias, de modo a compor um sistema de comunicação infraestruturado, com o intuito de fornecer a conectividade e manutenção dos dados [Sichitiu e Kihl, 2008; Liang et al., 2012].

É essencial, no entanto, que exista uma estratégia de posicionamento das unidades de infraestrutura rodoviária para alcançar a eficiência de uma rede veicular. Embora a densidade e a disponibilidade das RSUs determine a cobertura global de transmissão, o custo envolvido no processo de instalação e suporte torna-se inviável, a depender do número de equipamentos necessário [Reis et al., 2011]. Considerando o alcance da comunicação sem fio de uma estação base e o nível de conectividade exigido para uma determinada aplicação, o número necessário de RSUs pode aumentar significativamente. De acordo com Reis et al. [2011], essa incompatibilidade entre a eficiência de custos e a garantia de qualidade de serviço (QoS) é tratada como um desafio real no projeto de redes veiculares.

A fim de obter vantagens sobre ambos os tipos de sistema de comunicação e reduzir os efeitos de *trade-off* mencionados, uma abordagem amplamente utilizada no projeto de VANETs, tem sido empregar a arquitetura híbrida [Liang et al., 2012]. Nesse cenário, uma transmissão de infraestrutura para veículo (I2V) fornece o acesso à Internet, enquanto as comunicações de veículo para veículo (V2V) asseguram a disseminação de informações em um ambiente altamente dinâmico.

Diante da necessidade de avaliar as particularidades presentes em redes veiculares, Silva e Meira [2015] propuseram uma métrica específica para mensurar a qualidade de serviço em sistemas de comunicação veicular, denominada Deposição Delta ( $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ ). Delta reflete duas características essenciais na avaliação da qualidade de serviço (QoS): (i) delinear a experiência do usuário; e, (ii) conceder aos gestores o controle sobre os recursos, o que possibilita o desenvolvimento de estratégias de gestão. O parâmetro  $\rho_1$  denota o tempo mínimo, em relação ao tempo total de viagem, que cada veículo deve permanecer conectado. Por exemplo,  $\rho_1 = 0,5$  significa que o veículo precisa manter-se conectado durante 50% de sua jornada. Esse parâmetro está diretamente relacionado à experiência do usuário. Por outro lado, o parâmetro  $\rho_2$  especifica o número mínimo de veículos que devem experimentar a qualidade de serviço definida pelo parâmetro  $\rho_1$ . Dessa forma, supondo que seja definida uma rede  $\Delta_{0,3}^{0,5}$ , então pelo menos 30% do número total de veículos que circulam na rede devem permanecer conectados durante, pelo menos, 50% do tempo total da viagem realizada.

Neste trabalho propõe-se uma nova heurística baseada na técnica GRASP [Feo e Resende, 1995] para solucionar o problema de posicionamento das unidades de infraestrutura rodoviária, de modo a garantir as especificações da Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ . Diferentemente do trabalho apresentado por



Sarubbi et al. [2017], em que se propõe uma solução destinada unicamente a sistemas de comunicação infraestruturada, este trabalho analisa as implicações de uma arquitetura híbrida, considerando as comunicações entre veículos com transmissão de um único salto. O principal objetivo consiste em testar o comportamento do algoritmo sob diferentes valores do alcance da comunicação entre veículos, de forma a mensurar o impacto na utilização de uma rede com arquitetura híbrida em comparação a um sistema que admite apenas as comunicações de infraestrutura para veículo.

Este trabalho está organizado como segue: a Seção 2 apresenta uma seleção de trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta o contexto em que o sistema é abordado, seguido pela definição formal do problema e pela formulação de programação não-linear proposta. A Seção 4 apresenta um algoritmo baseado na metaheurística GRASP [Feo e Resende, 1995], desenvolvido para solucionar o problema proposto. A Seção 5 apresenta a descrição dos experimentos e uma análise sobre os respectivos resultados. A Seção 6 traz as considerações finais.

## 2. Trabalhos Relacionados

A importância de uma distribuição eficiente das unidades de comunicação na melhoria da qualidade de serviço oferecida foi evidenciada com o desenvolvimento das pesquisas no campo de redes veiculares, o que motivou estudos específicos em estratégias de posicionamento de RSUs. Filippini et al. [2012] inovaram ao desenvolver um jogo estratégico para modelar a dinâmica de alocação de unidades de infraestrutura, com base no objetivo de distribuição de conteúdos a veículos por meio de comunicações infraestruturadas. Kim et al. [2016] converteram o problema de posicionamento de RSUs em um novo problema de otimização da classe NP-difícil, por eles denominado *Generalized Budget Coverage Problem* (GBCP) e, através de algumas modificações no modelo criado, os autores propuseram um segundo problema de otimização, denominado *Budgeted Maximum Coverage with Cardinality Constraint*, do qual permitiu o desenvolvimento de um novo algoritmo de aproximação polinomial, capaz de gerar uma solução ao problema inicial.

Liang et al. [2012] apresentaram uma ferramenta de otimização, desenvolvida através de um modelo de Programação Linear Inteira, para obter uma solução ótima na alocação de unidades de infraestrutura rodoviária. O principal objetivo do modelo proposto pelos autores é encontrar um *trade-off* entre a cobertura de rede e o custo, o que é semelhante ao que se propõe neste trabalho, uma vez que o custo do processo é influenciado diretamente pelo número de RSUs instaladas. Um modelo PLI também é empregado na abordagem de Wu et al. [2012] para maximizar a taxa de transmissão agregada da rede. Mehar et al. [2015] propuseram uma solução para otimizar o posicionamento das unidades de comunicação em aplicações de redes veiculares sensíveis a atrasos. Como estratégia, os autores utilizam a combinação de um algoritmo genético com o clássico algoritmo de Dijkstra, também no intuito de diminuir o número de RSUs.

Alguns trabalhos apresentaram algoritmos fundamentados na métrica  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ , proposta por Silva e Meira [2015]. Nesse mesmo trabalho, os autores apresentaram uma heurística gulosa, designada como Delta-g, para solucionar a alocação de unidades de infraestrutura rodoviária e garantir os requisitos da Deposição Delta. Posteriormente, Sarubbi e Silva [2016] propuseram uma nova heurística gulosa, nomeada Delta-r, e demonstraram que os resultados alcançados pelo novo algoritmo são melhores, quando comparados aos resultados obtidos pelo algoritmo Delta-g e pelo algoritmo DL, proposto por Trullols et al. [2010]. Mais recentemente, Sarubbi et al. [2017] propuseram uma heurística baseada na clássica metodologia GRASP [Feo e Resende, 1995], revelando melhorias significativas nos resultados, quando comparados aos de trabalhos anteriores. Ainda sobre o trabalho de Sarubbi et al. [2017], os autores foram os primeiros a apresentar resultados exatos para o modelo de Programação Linear Inteira (PLI) desenvolvido no trabalho de Sarubbi e Silva [2016].

## 3. Descrição do Problema

Nesta seção, inicialmente, pretende-se contextualizar o sistema analisado, evidenciando as limitações e as especificações do problema abordado. Em seguida, o problema será conceituado formalmente, segundo definição da Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  [Silva e Meira, 2015]. Por fim, será proposto um novo modelo de Programação Não-Linear Inteira para o problema.



### 3.1. Contexto do Sistema

Em um cenário real de qualquer rede de comunicação, existem diversas variáveis inerentes ao meio de transmissão, que influenciam diretamente no desempenho da propagação de dados, dentre as quais é possível destacar taxa de transmissão, largura de banda, atenuação e até mesmo obstruções físicas (e.g. árvores, construções ou outros veículos). Neste trabalho, no entanto, o objetivo é solucionar o problema definido pela Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ , que constitui um problema de otimização combinatória, expresso pela alocação de infraestruturas rodoviárias. Isso significa que é proposto um modelo para o problema que não contempla a influência das variáveis mencionadas e assume condições ideais de conectividade. Alguns autores empregaram abordagens semelhantes para efeitos de simplificação do problema, tomando como base o conceito de *oportunidade de contato* [Zheng et al., 2010; Zhu et al., 2010; Malandrino et al., 2011; Silva et al., 2016; Sarubbi et al., 2017]. O próprio artigo seminal de Silva e Meira [2015] propõe o uso dessa estratégia ao descrever a Rede Delta.

A estratégia de posicionamento das unidades de infraestrutura rodoviária utilizada por este trabalho considera uma rede veicular híbrida com transmissão de um único salto (*single-hop*) e comunicação síncrona. Em sistemas de comunicação de um único salto, cada veículo pode enviar/receber dados apenas de/para outros veículos que estão restritos ao seu alcance de transmissão [Sichitiu e Kihl, 2008]. Em outras palavras, um veículo que não recebeu uma informação através de uma comunicação direta com uma infraestrutura não pode retransmitir tal informação a outros veículos, ainda que a distância entre eles seja compatível ao alcance da comunicação entre veículos. A Figura 1 representa um esquema de um sistema com transmissão de um único salto. A comunicação síncrona ocorre quando dois veículos estão suficientemente perto para uma transmissão entre veículos e, além disso, um desses veículos também está dentro do raio de transmissão de uma estação base (RSU), realizando simultaneamente uma comunicação infraestruturada e, portanto, dispondo do acesso direto à fonte de informação.

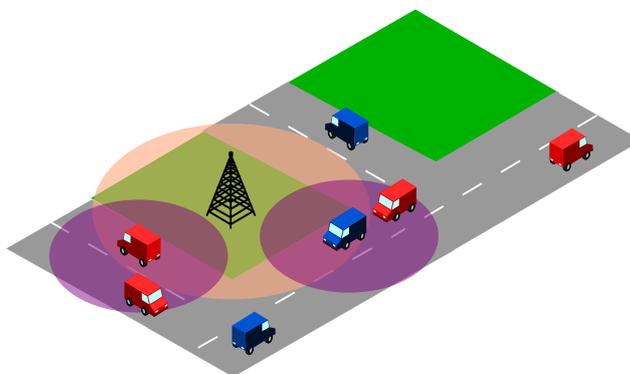


Figura 1: Sistema de comunicação de um único salto.

### 3.2. Definição do Problema

Define-se a Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  como um conjunto de unidades de comunicação que permite que  $\rho_2$  por cento dos veículos tenham a experiência de conectividade durante, pelo menos,  $\rho_1$  por cento do tempo total de tráfego.

**Definição 1 (Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ )** Seja  $M$  a representação da malha rodoviária, e  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  um conjunto de veículos viajando por  $M$ . Seja  $C \subset V$  o conjunto de veículos  $v_k$  que possuem uma experiência de conexão durante um percentual da viagem igual ou superior a  $\rho_1$ . Essa rede veicular é considerada  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  sempre que  $\frac{|C|}{|V|} \geq \rho_2$ .



### 3.3. Modelo Não-Linear Inteiro Misto

Nesta seção é apresentado um modelo de Programação Não-Linear Inteira para resolver a alocação de unidades de infraestrutura rodoviária em uma rede veicular com comunicação híbrida, de modo a assegurar as especificações da Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ . O modelo apresentado permite solucionar não apenas os sistemas de transmissão de um único salto, conforme objetivo a que se destina este trabalho, como também os sistemas de transmissão de múltiplos saltos.

Suponha os conjuntos: (i) conjunto de veículos  $V$ , em que  $V = \{1, 2, \dots, k\}$ ; (ii) conjunto de células urbanas  $U$ , onde é possível posicionar uma unidade de infraestrutura rodoviária, dado que  $U = \{0, 1, \dots, u\}$ ; e, (iii) conjunto de instantes de tempo  $T$ , em que  $T = \{1, 2, \dots, t\}$ .

Tem-se o seguinte conjunto de variáveis binárias:  $a_u$  é igual a 1 se uma célula urbana  $u$  é escolhida para receber uma RSU e é 0, caso contrário;  $v_k$  é igual a 1 se o veículo  $k$  pertence à solução e é 0, caso contrário;  $x_{kt}$  é igual a 1 se o veículo  $k$  experimenta uma oportunidade de contato no instante de tempo  $t$  através de comunicação infraestruturada e é 0, caso contrário;  $y_{kt}$  é igual a 1 se o veículo  $k$  experimenta uma oportunidade de contato no instante de tempo  $t$  através de comunicação entre veículos e é 0, caso contrário.

Tem-se também o seguinte conjunto de variáveis:  $I2V_{kt}$  expressa a fração de cobertura do veículo  $k$  em relação ao tempo total de viagem, alcançada no instante de tempo  $t$  através de comunicação infraestruturada;  $V2V_{kt}$  expressa a fração de cobertura do veículo  $k$  em relação ao tempo total de viagem, alcançada no instante de tempo  $t$  através de comunicação entre veículos.

O seguinte conjunto de parâmetros pode ser definido como:

- $r_{ukt}$ : é igual a 1 se o veículo  $k$  permanece na célula urbana  $u$  no instante de tempo  $t$  e é 0, caso contrário;
- $tv_k$ : tempo total de viagem do veículo  $k$ ;
- $\lambda$ : alcance da comunicação entre veículos;
- $d_{vkt}$ : distância entre os veículos  $i$  e  $j$  no instante de tempo  $t$ ;
- $\beta$ : granularidade do conjunto  $T$ .

Além das variáveis e parâmetros declarados, é necessário definir o conjunto de veículos alcançáveis a partir de cada veículo  $k \in V$ , para cada um dos instantes de tempo  $t \in T$ .

$$\Theta_{kt} = \{v \in V \mid d_{vkt} \leq \lambda\} \forall k \in V, \forall t \in T$$

Cada conjunto  $\Theta_{kt}$  representa todos os veículos que estão a uma distância menor que  $\lambda$  metros do veículo  $k$  no instante de tempo  $t$ . O modelo matemático é dado por:

$$\min \sum_{u \in U} a_u \quad (1)$$



$$\sum_{u \in U} (\beta \cdot r_{ukt} / tv_k) a_u = I2V_{kt} \quad \forall k \in V, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{v \in \Theta_{kt}} (\beta / tv_k) = V2V_{kt} \quad \forall k \in V, \forall t \in T \quad (3)$$

$$(I2V_{kt} \cdot x_{kt}) + (V2V_{kt} \cdot y_{kt}) \geq \rho_1 v_k \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{u \in U} r_{ukt} \cdot a_u = x_{kt} \quad \forall k \in V, \forall t \in T \quad (5)$$

$$x_{kt} + y_{kt} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{k \in V} v_k \geq \rho_2 |V| \quad (7)$$

$$a_u \in \{0, 1\} \quad \forall u \in U \quad (8)$$

$$v_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$x_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V, \forall t \in T \quad (10)$$

$$y_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V, \forall t \in T \quad (11)$$

A função objetivo (1) consiste em minimizar o número de unidades de infraestrutura rodoviária. As restrições (2), (3) e (4) garantem que um veículo é considerado parte da solução apenas se permanece conectado durante  $\rho_1\%$  do tempo total de viagem. As comunicações podem ser realizadas entre infraestrutura e veículo (2) ou entre veículos (3). A restrição (5) garante que seja estabelecida uma comunicação infraestruturada nos instantes de tempo em que um veículo percorre uma dada célula urbana  $u$  que recebeu uma unidade de comunicação. A restrição (6) garante que cada veículo estabeleça um único tipo de comunicação a cada instante de tempo. A restrição (7) assegura que um número mínimo de veículos é escolhido para pertencer à solução. As equações (8), (9), (10) e (11) são restrições que garantem o domínio das variáveis.

#### 4. Algoritmo Proposto

Nesta seção será apresentado o algoritmo  $\Delta_r GRASP2_{SH}$ , estratégia proposta por este trabalho para solucionar a Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  em uma rede de transmissão de salto único com comunicação síncrona. O algoritmo proposto é baseado no trabalho apresentado por Sarubbi et al. [2017], cujo algoritmo foi desenvolvido com o intuito de minimizar o número de RSUs para atender  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  empregando apenas a comunicação infraestruturada. Contudo, diferentemente do algoritmo anterior, este permite que cada veículo receba uma informação por duas formas distintas: (i) através da comunicação direta com uma infraestrutura; ou (ii) através de uma retransmissão de um único salto, que ocorre quando o veículo está fora do alcance de transmissão de uma estação base (RSU), mas dentro do raio de comunicação de outro veículo conectado a uma infraestrutura.

---

#### Algoritmo 1: $\Delta_r GRASP2_{SH}$

---

**Data:**  $M, V, T, \alpha, \rho_1, \rho_2, \lambda, Max\_Iters$

```

1 for  $it \leftarrow 1$  to  $Max\_Iters$  do
2   | Fase_de_Construção( $M, V, T, \alpha, \rho_1, \rho_2, \lambda$ );
3   | Busca_Local( $M, V, T, \rho_1, \rho_2$ );
4 end

```

---

O algoritmo  $\Delta_r GRASP2_{SH}$ , assim como o algoritmo base, é uma aplicação fundamentada na metaheurística multi-partida GRASP [Feo e Resende, 1995] (do inglês *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). A técnica consiste em realizar, repetidamente, uma amostragem do espaço de busca para construção de uma solução inicial viável, seguida por um método de refinamento. Tais etapas são executadas, respectivamente, pelos procedimentos: (i) Fase de Construção;



(ii) Busca Local. Ao final, o resultado retornado é simplesmente a melhor solução encontrada em todas as iterações. Especificamente para o algoritmo proposto, cada uma das etapas mencionadas permite computar tanto a comunicação entre veículos, quanto a comunicação baseada em infraestrutura. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo genérico do  $\Delta_r GRASP_{2SH}$ .

#### 4.1. Fase de Construção

A *Fase de Construção* tem por objetivo básico promover a diversidade entre as soluções iniciais geradas a cada iteração do GRASP. Esse propósito é alcançado com a incorporação do critério de aleatoriedade a uma função gulosa. Isso significa que, ao invés de sempre escolher o melhor elemento para compor o conjunto solução, cada elemento é escolhido aleatoriamente dentre os contidos em uma Lista Restrita de Candidatos (LRC). Todo elemento agrega um custo para integrar o conjunto solução, de acordo com a avaliação de uma determinada função gulosa. O algoritmo proposto mantém como função gulosa o critério do *tempo relativo de contato* empregado pelo algoritmo de Sarubbi et al. [2017] e inicialmente apresentado pelo algoritmo Delta-r [Sarubbi e Silva, 2016].

---

#### Algoritmo 2: Fase de Construção

---

**Data:**  $M, V, T, \alpha, \rho_1, \rho_2, \lambda$

- 1  $Solucao \leftarrow \emptyset$ ;
- 2 **while**  $\frac{|C|}{|V|} < \rho_2$  **do**
- 3     Construir\_LRC( $M, T, V, \alpha, \rho_1$ );
- 4     *Celula\_Selecionada*  $\leftarrow$  Escolhe\_Elemento\_Aleatoriamente(*LRC*);
- 5     *Solucao*  $\leftarrow$  *Solucao*  $\cup$  *Celula\_Selecionada*;
- 6     Conectar( $M, V, T, \rho_1, \lambda, Celula_Selecionada$ );
- 7 **end**

---

O processo de seleção de elementos candidatos, portanto, é determinado pela classificação das células urbanas, que ocorre com base na contabilização do tempo relativo de contato referente a cada uma das células. A classificação tem por princípio privilegiar os elementos com um menor custo associado, de modo a compor a LRC com os melhores elementos. No Algoritmo 2 são apresentados cada um dos passos que constituem a *Fase de Construção* e o pseudocódigo para o procedimento *Construir\_LRC* é apresentado pelo Algoritmo 3.

O critério de aleatoriedade utilizado na construção da LRC é definido conforme valor atribuído ao parâmetro  $\alpha$ , que permite receber valores entre 0.0 e 1.0. A atribuição de 0.0 a  $\alpha$  faz com que a LRC sempre tenha apenas o melhor elemento, resultando no comportamento de um algoritmo puramente guloso. De outra forma, a atribuição de 1.0 a  $\alpha$  implica em popular a LRC com todos os elementos possíveis, resultando em uma escolha absolutamente aleatória. Além disso, construir a LRC com muitos elementos possibilita gerar um espaço de inúmeras soluções diferentes para um mesmo critério de qualidade de serviço estabelecido por  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ .

O que diferencia a *Fase de Construção* do algoritmo proposto, em relação ao mesmo método no algoritmo de Sarubbi et al. [2017], é a possibilidade de conectar mais veículos a cada infraestrutura instalada, como mostra o procedimento apresentado pelo Algoritmo 4. Uma vez que seja possível a comunicação entre uma infraestrutura e um veículo em um determinado instante de tempo, o procedimento *Incrementa\_Tempo\_Cobertura\_I2V* é responsável por acrescer esse tempo de comunicação ao tempo de cobertura acumulado do veículo, calculado como fração do tempo total de viagem. O procedimento *Verifica\_Comunicação\_V2V*, por sua vez, verifica para um dado veículo em uma unidade específica de tempo, todos os veículos alcançáveis para estabelecer uma possível comunicação entre veículos. Como princípio, para que a comunicação entre dois veículos seja efetiva, a distância entre eles deve ser menor ou igual ao limite do alcance de uma comunicação V2V. Além disso, os critérios de uma comunicação síncrona devem ser sempre considerados.



---

**Algoritmo 3: Construir\_LRC**

---

**Data:**  $M, T, V, \alpha$

- 1  $LRC \leftarrow \emptyset$ ;
- 2  $CelulaMin \leftarrow \text{Seleciona\_Celula\_Menor\_Relativo\_Contato}()$ ;
- 3  $CelulaMax \leftarrow \text{Seleciona\_Celula\_Maior\_Relativo\_Contato}()$ ;
- 4  $Min \leftarrow \text{Seleciona\_Tempo\_Relativo\_Contato}(CelulaMin)$ ;
- 5  $Max \leftarrow \text{Seleciona\_Tempo\_Relativo\_Contato}(CelulaMax)$ ;
- 6 **foreach** *Célula remanescente*  $u$  **do**
- 7     **if**  $\text{Tempo\_Relativo\_Contato}(u) \leq [Max - \alpha(Max - Min)]$  **then**
- 8          $LRC \leftarrow LRC \cup u$ ;
- 9     **end**
- 10 **end**

---

---

**Algoritmo 4: Conectar**

---

**Data:**  $M, V, T, \rho_1, \lambda, Celula\_Selecioada$

- 1 **foreach**  $k$  que percorre  $Celula\_Selecioada$  **do**
- 2     **foreach**  $t_k$  remanescente em  $Celula\_Selecioada$  **do**
- 3         Incrementa\_Tempo\_Cobertura\_I2V( $\rho_1, k$ );
- 4         Verifica\_Comunicação\_V2V( $M, V, T, \lambda, k, t_k$ );
- 5     **end**
- 6 **end**

---

## 4.2. Busca Local

Ao aplicar a busca local a partir de uma solução gerada pela *Fase de Construção*, tem-se como objetivo encontrar um caminho de melhoria de custo até uma solução localmente ótima, de acordo com a estrutura de vizinhança escolhida. O algoritmo de busca local é um processo iterativo, que atua através de substituições sucessivas da solução corrente por uma solução melhor, pertencente ao espaço de soluções vizinhas. O algoritmo termina quando não é possível encontrar uma solução melhor do que a atual. O Algoritmo 6 mostra, em linhas gerais, os passos executados pelo método de busca local empregado.

A respeito da Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ , o conjunto solução corresponde ao menor conjunto de células designadas para posicionar unidades de infraestrutura rodoviária, em consonância ao nível de QoS estabelecido pelos parâmetros  $\rho_1$  e  $\rho_2$ . A vizinhança dessa solução, por sua vez, corresponde a cada um dos conjuntos de células que diferem em uma unidade de infraestrutura da solução corrente, de modo a garantir o mesmo padrão estabelecido por  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ .

Para fundamentar a retirada de uma ou mais unidades de infraestrutura a partir de uma solução já construída, sem que os critérios definidos pela Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$  deixem de ser assegurados, são consideradas algumas situações possíveis: (i) todos os veículos cobertos por certa unidade de infraestrutura são suficientemente atendidos por outras comunicações realizadas ao longo de toda viagem, mantendo a condição estabelecida pelo parâmetro  $\rho_1$ ; (ii) é possível substituir cada uma das comunicações realizadas por certa unidade de infraestrutura a partir da certificação de existência de uma comunicação entre veículos no mesmo instante; (iii) existem veículos que dependem do tempo de conexão realizado com certa unidade de infraestrutura para garantir a condição estabelecida pelo parâmetro  $\rho_1$ , no entanto é possível que mesmo com menos veículos cobertos a condição definida pelo parâmetro  $\rho_2$  não seja violada.

A ocorrência de qualquer uma das situações descritas, portanto, valida a retirada de uma unidade de infraestrutura rodoviária. Especificamente em função da situação (ii), durante cada iteração da busca local, em que se avalia a viabilidade de retirar uma determinada RSU, é necessário



---

**Algoritmo 5:** Verifica\_Comunicação\_V2V

---

**Data:**  $M, V, T, \lambda, k, t_k$

```
1 foreach  $k' \in V$  de tal modo que  $k' \neq k$  do
2   | foreach  $t_{uk'} = t_k$  do
3   |   | if  $Distância(k, k') \leq \lambda$  then
4   |   |   | Incrementa_Tempo_Cobertura_V2V( $\rho_1, k'$ );
5   |   | end
6   | end
7 end
```

---

---

**Algoritmo 6:** Busca Local

---

**Data:**  $M, V, T, \rho_1, \rho_2, \lambda, Solucao$

```
1 foreach  $RSU \in Solucao$  do
2   | Tentar_Substituir_Comunicações( $M, V, T, \lambda, RSU$ );
3   | if  $\frac{|C|}{|V|} \geq \rho_2$  then
4   |   |  $Solucao \leftarrow Solucao - RSU$ ;
5   |   | Substituir_Comunicações( $M, V, T$ );
6   | end
7 end
```

---

verificar a possibilidade de substituir cada uma das comunicações realizadas por uma comunicação entre veículos no mesmo instante. Para substituir uma comunicação infraestruturada por uma comunicação entre veículos, o método de busca local utiliza os mesmos critérios empregados pelo Algoritmo 4, apresentado como um procedimento da *Fase de Construção*.

## 5. Experimentos

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados, comparando os resultados obtidos pelo algoritmo proposto para diferentes valores de  $\lambda$ , alcance da comunicação entre veículos. Os experimentos são baseados no rastro (*trace*) realístico de mobilidade da cidade de Colônia, <sup>1</sup> na Alemanha. O *trace* é composto por 7.200 segundos de tráfego e abrange 75.515 veículos. Os resultados apresentados, entretanto, referem-se a instâncias do *trace* que utilizam os primeiros 1.000, 5.000 e 10.000 veículos. Todos os experimentos são interpretados através do simulador SUMO <sup>2</sup>, que processa o cenário da cidade de Colônia e fornece as localidades de cada veículo (registros de mobilidade T) ao longo do tempo. Um Programa de Particionamento lê os registros de mobilidade T e particiona o cenário em uma matriz de  $\psi \times \psi$  células, traduzindo os registros de mobilidade de coordenadas cartesianas para coordenadas da matriz. Todos os experimentos utilizam  $\psi = 100$ , resultando em uma área coberta de aproximadamente  $280m \times 320m$  para cada célula urbana.

Neste trabalho são apresentados resultados para três diferentes combinações de  $\rho_1$  e  $\rho_2$ : (i)  $\Delta_{0,9}^{0,1}$ ; (ii)  $\Delta_{0,5}^{0,5}$ ; e (iii)  $\Delta_{0,1}^{0,9}$ . Como objetivo, deseja-se verificar o comportamento do algoritmo por meio da análise dos resultados obtidos quando os parâmetros  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são muito distintos e quando eles são iguais. Para cada uma das combinações testadas, o algoritmo foi executado 11 vezes utilizando os seguintes parâmetros:  $Max\_Iters = 100$ ,  $\alpha = 0,40$  e  $\lambda = \{0, 50, 100, 150, 200, 250\}$ . Quando  $\lambda = 0$ , o algoritmo proposto não lida com a comunicação entre veículos, devendo apresentar um comportamento equivalente ao do algoritmo de Sarubbi et al. [2017].

A Figura 2 apresenta o número médio de RSUs encontrado pelo algoritmo proposto em todos os cenários de teste descritos. Especificamente sobre a instância de 1.000 veículos, a figura

---

<sup>1</sup>Disponível em <http://kolntrace.project.citi-lab.fr/>

<sup>2</sup>Disponível em <http://sumo-sim.org>

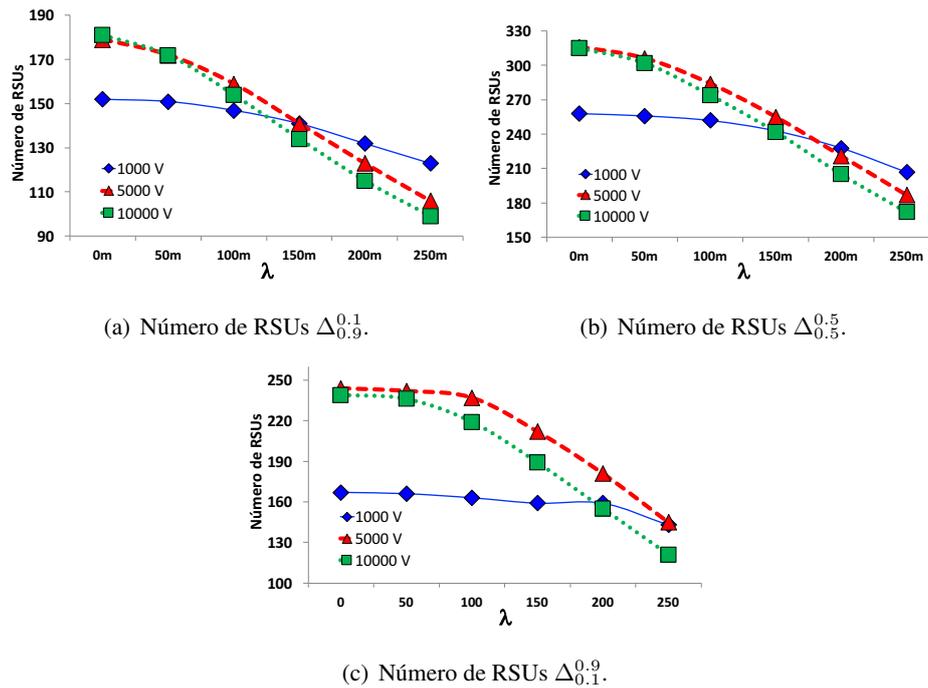


Figura 2: Esta figura representa o número de RSUs obtido pelo algoritmo proposto a partir de diferentes valores de  $\lambda$ . A curva sólida em azul, a curva tracejada em vermelho e a curva pontilhada em verde representam, respectivamente, o número de RSUs para a *trace* de 1.000, 5.000 e 10.000 veículos.

mostra que o número de unidades de comunicação não diminui significativamente quando o valor de  $\lambda$  aumenta. Isso possivelmente ocorre devido à dispersão dos veículos. Como o número de veículos é menor, então presume-se que o número de oportunidades de contato seja escasso, uma vez que a comunicação entre veículos exige que os veículos estejam suficientemente perto uns dos outros e no mesmo instante de tempo. Também é interessante notar que, em função dessa suposta dispersão presente na instância de 1.000 veículos, quando  $\lambda = 250$  e empregando-se as combinações  $\Delta_{0,9}^{0,1}$  e  $\Delta_{0,5}^{0,5}$ , o número de RSUs é maior do que nas instâncias de 5.000 e 10.000 veículos.

Em contrapartida, para a instância de 10.000 veículos é possível notar um ganho bastante significativo quando  $\lambda = 250$ . Como mostra a Figura 3, ao utilizar  $\rho_1$  e  $\rho_2$  iguais a 0,5, o número de RSUs diminui mais de 45%, quando comparado ao número de RSUs obtido para  $\lambda = 0$ .

É sempre conhecido que quando o alcance da comunicação entre veículos aumenta, o número de RSUs deve diminuir. No entanto, nem sempre é claro e demonstrado qual é o ganho marginal quando o alcance da comunicação entre veículos aumenta. Em outras palavras, qual é o impacto relativo no número de RSUs ao aumentar em uma unidade o raio de comunicação entre veículos. Como nos testes realizados por este trabalho os valores de  $\lambda$  variam 50 metros uns dos outros, na Figura 4 o ganho marginal apresentado considera 50 metros como uma unidade de distância. A Figura 4 mostra que, em geral, à medida que o valor de  $\lambda$  aumenta, o ganho relativo marginal também aumenta. Em outras palavras, aumentar o valor de  $\lambda$  de 200m para 250m parece ter um impacto maior que aumentar o valor de  $\lambda$  de 0m para 50m.

## 6. Considerações Finais

Nesse trabalho foi proposto um novo algoritmo, baseado na metaheurística GRASP [Feo e Resende, 1995], para o posicionamento de unidades de infraestrutura rodoviária em uma rede veicular híbrida com comunicação síncrona. O algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de minimizar o número de RSUs empregado para assegurar as especificações da métrica Deposição Delta [Silva e

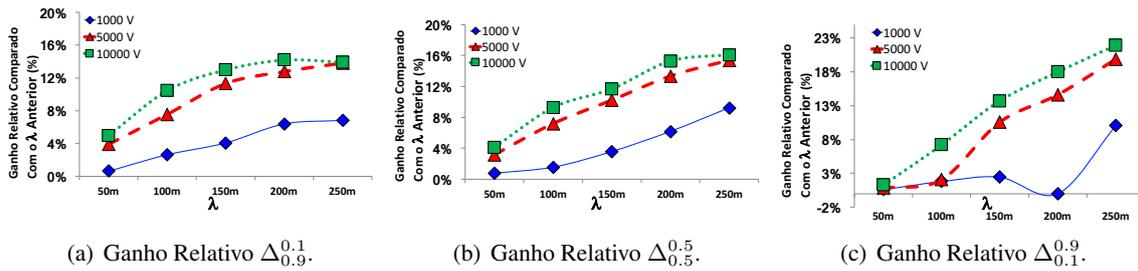


Figura 3: Esta figura representa a variação percentual entre o número de RSUs obtido a partir de cada valor de  $\lambda > 0$  em relação o número obtido a partir de  $\lambda = 0$ . O eixo x representa os vários valores de  $\lambda$ , enquanto o eixo y representa o ganho relativo, em percentual.

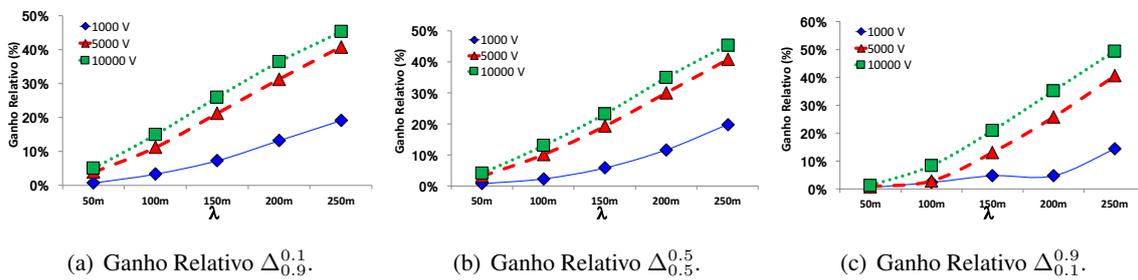


Figura 4: Esta figura representa a variação percentual entre o número de RSUs obtido a partir de um valor de  $\lambda$  em relação ao número obtido a partir do valor de  $\lambda$  anterior. O eixo x representa os vários valores de  $\lambda$ , enquanto o eixo y representa o ganho relativo, em percentual. Como exemplo, se  $\lambda = 200$  está associado a um ganho relativo de 15%, então significa que são necessários 15% menos RSUs em relação a  $\lambda = 150$ .

Meira, 2015]. Além disso, esse trabalho apresentou um modelo de Programação Não-Linear Inteira como nova formulação ao problema. Através dos experimentos realizados, notou-se que, quanto maior o alcance da comunicação entre veículos, menor o número necessário de RSUs para atender uma mesma especificação  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ . Também foi observado que, não necessariamente uma rede com mais veículos requer mais unidades de infraestrutura. Ao contrário, um número pequeno de veículos em circulação faz com que as oportunidades de contato sejam escassas, principalmente em uma rede com transmissão síncrona, o que demanda um número maior de unidades de infraestrutura para garantir a qualidade de serviço definida pela Deposição  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ . Como trabalho futuro, pretende-se analisar as influências exercidas pelo número de saltos de transmissão das comunicações entre veículos, em relação ao número necessário de RSUs para assegurar um certo nível de qualidade de serviço especificado pela métrica  $\Delta_{\rho_2}^{\rho_1}$ .

### Agradecimentos

Esse trabalho foi parcialmente financiado por CAPES, CNPq e FAPEMIG.

### Referências

- Feo, T. A. e Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2):109–133.
- Filippini, I., Malandrino, F., Dán, G., Cesana, M., Casetti, C., e Marsh, I. (2012). Non-cooperative rsu deployment in vehicular networks. In *2012 9th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*, p. 79–82.
- He, R., Rutagemwa, H., e Shen, X. (2008). Differentiated reliable routing in hybrid vehicular ad-hoc networks. In *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*. IEEE.



- Kim, D., Velasco, Y., Wang, W., Uma, R., Hussain, R., e Lee, S. (2016). A new comprehensive rsu installation strategy for cost-efficient vanet deployment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, PP(99).
- Ku, I., Lu, Y., Gerla, M., Ongaro, F., Gomes, R. L., e Cerqueira, E. (2014). Towards software-defined vanet: Architecture and services. In *Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), 2014 13th Annual Mediterranean*. IEEE.
- Liang, Y., Liu, H., e Rajan, D. (2012). Optimal placement and configuration of roadside units in vehicular networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th*. IEEE.
- Malandrino, F., Casetti, C., Chiasserini, C.-F., e Fiore, M. (2011). Content downloading in vehicular networks: What really matters. In *Proceedings - IEEE INFOCOM*.
- Mehar, S., Senouci, S. M., Kies, A., e Zoulikha, M. M. (2015). An optimized roadside units (rsu) placement for delay-sensitive applications in vehicular networks. In *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, p. 121–127.
- Papadimitratos, P., Buttyan, L., Hubaux, J.-P., Kargl, F., Kung, A., e Raya, M. (2007). Architecture for secure and private vehicular communications. In *Telecommunications, 2007. ITST '07. 7th International Conference on ITS*. IEEE.
- Reis, A. B., Sargento, S., e Tonguz, O. K. (2011). On the performance of sparse vehicular networks with road side units. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*. IEEE.
- Sarubbi, J. F. M. e Silva, C. M. (2016). Delta-r: A novel and more economic strategy for allocating the roadside infrastructure in vehicular networks with guaranteed levels of performance. In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2016 IEEE*.
- Sarubbi, J. F. M., Silva, T. R., Martins, F. V. C., Wanner, E. F., e Silva, C. M. (2017). A grasp based heuristic for deployment roadside units in vanets. In *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), 2017 IEEE*.
- Sichitiu, M. e Kihl, M. (2008). Inter-vehicle communication systems: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 10(8).
- Silva, C. M., Guidoni, D. L., Souza, F. S., Pitangui, C. G., Sarubbi, J. F. M., Aquino, A. L. L., Jr, W. M., Nogueira, J. M. S., e Pitsillides, A. (2016). Using the inter-contact time for planning the communication infrastructure in vehicular networks. In *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*.
- Silva, C. M. e Meira, W. (2015). Evaluating the performance of heterogeneous vehicular networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC), 2015 IEEE*.
- 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.
- Wu, T. J., Liao, W., e Chang, C. J. (2012). A cost-effective strategy for road-side unit placement in vehicular networks. *IEEE Transactions on Communications*, 60(8):2295–2303.
- Zheng, Z., Lu, Z., Sinha, P., e Kumar, S. (2010). Maximizing the contact opportunity for vehicular internet access. In *2010 Proceedings IEEE INFOCOM*, p. 1–9.
- Zhu, H., Fu, L., Xue, G., Zhu, Y., Li, M., e Ni, L. M. (2010). Recognizing exponential inter-contact time in vanets. In *2010 Proceedings IEEE INFOCOM*, p. 1–5.