

Deposição Primária: Garantindo a Primeira Conexão de Veículos à Infraestrutura Fixa em um Tempo Determinado

Leonardo A. L. Santos^{1,2}, Cristiano M. Silva², João F. M. Sarubbi³,
Luciana Lourdes Silva⁴, Frederico Chaves Carvalho¹,
Luís H. C. Reis¹, José Marcos Silva Nogueira¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG/DCC) – MG – Brasil

²Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ/DTECH) – MG – Brasil

³Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/DECOM) – MG – Brasil

⁴Instituto Federal de Educação Tecnológica (IFMG) – MG – Brasil

{leonardo.alvarenga,cristiano}@ufs.br, joao@cefetmg.br

luciana.lourdes.silva@ifmg.edu.br

fredericochaves,luiscantelli,jmarcos}@dcc.ufmg.br

Abstract. *This work presents a new approach to the allocation of communication infrastructure for vehicular networks. The goal is to maximize the number of vehicles having their first contact with the infrastructure within a predefined time limit. The application of this strategy allows for the identification of traffic entry points in the vehicular network, which are essential for controlling the capacity of the road system and the communication system. In terms of traffic and vehicular network management, entry points are locations where traffic monitoring systems can be implemented to collect real-time data and readjust the network in response to changes in vehicle flow. The results demonstrate that the Primary Deposition strategy can increase the number of vehicles reaching a coverage area when compared to the intuitive strategy of allocating communication units at points with the highest vehicle flow.*

Resumo. *Este trabalho apresenta uma nova forma de alocação de infraestrutura de comunicação para rede veiculares. O objetivo é maximizar a quantidade de veículos tendo o seu primeiro contato com a infraestrutura dentro de um limite pré-definido de tempo. A aplicação dessa estratégia permite identificar os pontos de entrada de tráfego na rede veicular, fundamentais para o controle da capacidade do sistema viário e do sistema de comunicações. Em termos de gestão do tráfego e da rede veicular, os pontos de entrada são locais onde sistemas de monitoramento de tráfego podem ser implementados para coletar dados em tempo real e readequar a rede mediante mudanças no fluxo de veículos. Os resultados demonstram que a Deposição Primária consegue aumentar a quantidade de veículos atingindo uma área de cobertura, quando comparada com a estratégia intuitiva de se alocar as unidades de comunicação nos pontos de maior fluxo de veículos.*

1. Introdução

Os veículos conectados representam uma revolução na indústria automotiva, incorporando tecnologias que possibilitam a interconexão entre veículos e infraestrutura [Silva et al. 2023]. Essa interconexão, que viabiliza a troca de informações em tempo real, é parte fundamental dos Sistemas de Transportes Inteligentes (STI), nos quais a coleta, análise e utilização de dados se tornam os elementos essenciais para aprimorar a segurança, eficiência e sustentabilidade no tráfego urbano e rodoviário, possibilitando a criação de estratégias mais eficazes de mobilidade urbana [Guidoni et al. 2022]. Um caminho viável para impulsionar essas inovações parece ser a ampla adoção de tecnologias de informação e comunicação no gerenciamento dos deslocamentos de veículos, impulsionada especialmente pelo advento das novas gerações de redes de comunicação 5G e *beyond* [Bastos et al. 2018; Swain et al. 2018]. Essas são as principais tecnologias que possibilitam a integração de veículos, semáforos, sinalizações de trânsito, vias inteligentes, autoridades de trânsito e todas as demais entidades envolvidas no sistema de tráfego [Silva et al. 2017a].

Este trabalho estuda uma forma de implantar uma rede de comunicação veicular fixa, do tipo veículo-para-infraestrutura (V2I), denominada Deposição¹ Primária: veículos podem se comunicar de forma *ad-hoc*, mas seu desempenho pode ser aprimorado por uma infraestrutura mínima de comunicação, aqui chamada de Unidades de Comunicação² (UC), interconectadas através de redes de alta velocidade, permitindo a coleta e disseminação de dados de tráfego entre motoristas e sistemas especialistas responsáveis pela gestão da rede. A deposição de UC nas bordas da rede tem como objetivo identificar os principais pontos de entrada, ou seja, os locais onde uma parte relevante dos veículos entrem e saiam da rede veicular. O termo *Deposição Primária* foi cunhado para indicar uma proposta de implantação de infraestrutura de rede veicular capaz de mapear a entrada de veículos na malha viária através da instalação de uma quantidade mínima de unidades de comunicação em uma zona urbana.

Na literatura, diversos trabalhos contribuem para o desenvolvimento de redes veiculares visando proporcionar qualidade de serviço (QoS) para o usuário final, através de diversas estratégias com métricas ou características distintas. Até onde pesquisamos, não encontramos um trabalho que tenha tratado desse problema e apresentado uma forma de mapear a entrada de veículos na malha viária, através da alocação de poucas UC.

A contribuição deste trabalho indica que a Deposição Primária é capaz de alocar uma quantidade muito pequena de UC e garantir que um expressivo percentual da frota urbana veicular acesse uma dessas unidades em um tempo determinável. Uma vez que os veículos acessam essa rede em (τ) segundos após iniciarem seu trajeto, é possível para o sistema de Gestão Inteligente da Rede coletar dados além de aprender rotas e deslocamentos com mais precisão. Para isso, este trabalho utiliza a estratégia baseada na heurística GRASP [Resende and Ribeiro 2016] aplicada a um cenário realístico da cidade de Colônia-Alemanha [Uppoor et al. 2014].

¹O 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.

²Esse trabalho utiliza a expressão “unidades de comunicação” para se referir ao termo “*roadside units*”, cujo significado literal é “unidades de (comunicação) beira de estrada”.

Como *baseline*, faz-se uma comparação inicial com a estratégia intuitiva de alocação de UC nas áreas mais populares da malha viária (áreas de maior concentração de veículos). Os resultados demonstram que alocar as UC nessas áreas de alta concentração de veículos não é uma alternativa viável quando se busca maximizar a quantidade de veículos que têm o seu primeiro encontro com a infraestrutura de comunicação em um tempo curto determinável.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A seção 3 descreve o problema. A seção 4 apresenta as possíveis soluções para o problema usando uma heurística gulosa e outra baseada em GRASP. A seção 5 apresenta uma métrica usada como *baseline* para comparação das duas heurísticas propostas. A seção 6 descreve os experimentos realizados e apresenta os resultados alcançados. A seção 7 conclui o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Estratégias para planejamento e implementação de redes veiculares são temas amplamente explorados na literatura. Em 2009, [Zheng et al. 2009] introduziram o conceito de cobertura α , uma métrica usada para avaliar o desempenho de redes veiculares, que posteriormente foi usada como inspiração para o desenvolvimento da Rede Ômega [Silva et al. 2021], que mede um aspecto de QoS da rede. Os autores que propõem a Cobertura *Alpha* a especificaram para assegurar a interconexão V2I em termos de distância percorrida. Uma rede veicular é considerada de cobertura α se um veículo percorrer qualquer trajeto de comprimento α e passar, pelo menos, por uma UC infraestruturada. Já a Rede Delta [Silva et al. 2019] considera o tempo de deslocamento em vez da distância percorrida para solucionar o mesmo problema.

Nos estudos conduzidos em [Trullols et al. 2010] e [Cataldi and Harri 2011], a modelagem da alocação de UC é apresentada como um problema de máxima cobertura, com a premissa inicial de conhecimento prévio das trajetórias dos veículos. No entanto, esta premissa é relaxada em trabalhos subsequentes [Silva et al. 2014; Silva et al. 2015; Silva et al. 2016], que propõem modelos de complexidades crescentes, baseados exclusivamente na taxa de migração de veículos entre regiões. Além disso, a literatura também inclui estudos analíticos relevantes. Em [Bazzi et al. 2011], os sistemas celulares são considerados a solução mais viável a curto prazo para a coleta de mensagens informativas de veículos por um centro de controle remoto. O trabalho apresenta um modelo matemático para avaliar a capacidade e cobertura em cenários simplificados.

[Lu et al. 2014] destacam que os veículos conectados são esperados como a próxima fronteira na revolução automotiva. [Silva et al. 2017b] abordam uma estratégia de implementação das UC que permite apoiar adequadamente a disseminação de uma variedade de conteúdos, cada um exigindo níveis específicos de desempenho. Como linha de base, a estratégia é comparada com a abordagem de colocar UC nos locais mais densos da via. Os resultados mostram que a estratégia conseguiu alocar um número menor de UC em comparação à linha de base.

3. Descrição do Problema

A Deposição Primária foi projetada para capturar a maior quantidade de informações relativas ao percurso realizado por veículos que trafegam em um ambiente urbano, através

da implantação de uma infraestrutura à rádio (mínima) instalada em pontos estratégicos. Quanto antes um veículo se conecta à infraestrutura, maior quantidade de informações (trajetos, hábitos, gargalos, etc...) podem ser coletadas e usadas para a gestão inteligente do tráfego. A Deposição Primária propõe uma dada deposição de UC, sob um percentual da malha viária urbana (ρ) de tal maneira que seja possível disponibilizar o acesso à rede à uma parcela da frota circulante em um tempo igual ou inferior à (τ) segundos. A grandeza (ρ) também está relacionada às células onde a deposição de UC será avaliada (pela implantação do algoritmo: definimos apenas uma UC por célula) e conseqüentemente a um número de veículos que estão contidos nessas células, conforme descrito na Seção 4.

A rápida conexão à infraestrutura é essencial para habilitar serviços avançados, como comunicação veículo-para-veículo (V2V) e veículo-para-infraestrutura (V2I), sistemas de assistência ao motorista e até mesmo para futuras aplicações autônomas. Implementada conforme descrita nesse trabalho, a Deposição Primária pode ser ajustada para que os veículos possam ser cobertos pela infraestrutura fixa com tempos variáveis de intercepção (segundos), a partir do momento em que o veículo deixa seu ponto de partida. Como a Deposição Primária descreve uma relação de conectividade, ela também pode ser utilizada para o planejamento e expansão de redes veiculares.

Além de alocar as unidades de comunicação de modo a permitir que os veículos estabeleçam contato com a infraestrutura em um tempo determinável, ela também traz diversas vantagens em um cenário de rede veicular, como a rápida resposta e comunicação eficiente, que viabiliza a comunicação imediata de informações críticas, como alertas de tráfego, atualizações de segurança e condições da estrada. Isso pode melhorar a eficiência da comunicação e a capacidade de resposta em situações de emergência no trânsito, por exemplo. Podemos entender que quanto mais rápido um veículo estiver conectado à infraestrutura, desde seu início de percurso, maior será o tempo disponível para que os sistemas de segurança e assistência ao motorista ajam. Isso pode ser crucial em situações nas quais a prevenção de acidentes é fundamental.

Os dados, obtidos a partir da implantação dessa proposta, podem ainda ser usados para o dimensionamento da implantação de *data-centers*, locais ou centralizados, viabilizando a oferta de serviços diferentes em diferentes áreas da cidade, de acordo com sua demanda, em tempo real, através da medida do fluxo de veículos que nela trafegam. Ao receber dados dos veículos, como velocidade e direção em tempo real, bem como inferir padrões de tráfego, a infraestrutura pode otimizar a gestão do tráfego, ajustando semáforos, rotas recomendadas e fluxos de veículos para minimizar congestionamentos.

3.1. Modelo Matemático

Dado um conjunto de veículos K , $K = \{1, 2, \dots, k\}$, um conjunto de partições da rede veicular C , $C = \{1, 2, \dots, c\}$ e a porcentagem mínima da malha viária urbana que devem ter seu primeiro contato com a rede em um tempo igual ou inferior a (τ) segundos, o objetivo é escolher o menor conjunto de células urbanas para instalar as unidades de comunicação (UC) de modo que uma parcela dos veículos que circulam na rede comuniquem com alguma UC nos primeiros (τ) segundos da sua viagem. Cada veículo pode contactar mais de uma UC e cada UC pode conectar mais de um veículo. Para esse problema, um modelo de programação linear inteira pode ser formulado com as seguintes variáveis:

$$a_c = \begin{cases} 1, & \text{se a célula urbana } c \text{ recebe uma unidade de comunicação (UC)} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$v_k = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ atravessa uma UC nos primeiros } \tau \text{ segundos da sua viagem} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

e o seguinte conjunto de parâmetros:

$$m_{ck} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ atravessa a célula urbana } c \text{ nos primeiros } \tau \text{ segundos da sua viagem} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O modelo matemático pode ser definido como:

$$\max \sum_{c \in C} v_k \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\forall c \in C, \forall k \in K \mid m_{ck}=1} a_c \leq \rho \quad (2)$$

$$\sum_{\forall c \in C \mid m_{ck}=1} a_c \geq v_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$v_k \geq A_c \quad \forall c \in C, \forall k \in K \mid m_{ck} = 1 \quad (4)$$

$$a_c \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$v_k \in \{0, 1\} \quad (6)$$

$$(7)$$

Função objetivo (1) maximiza o número de veículos distintos que alcançam as unidades de comunicação. A Restrição (2) garante que o número de células urbanas selecionadas seja sempre menor ou igual a $|\rho|$. A Restrição (3) garante que sempre que o veículo k estiver coberto, pelo menos uma das células urbanas atravessadas por k tenha uma unidade de comunicação. A Restrição (4) garante que sempre que o veículo k atravessar uma célula urbana com uma unidade de comunicação, então o veículo k estará coberto. As Restrições (5) e (6) são as restrições de integralidade.

4. Soluções Investigadas pela Deposição Primária

Nessa seção são apresentadas duas soluções para a Deposição Primária. A primeira estratégia consiste em uma heurística gulosa, que percorre a malha viária e instala as unidades de comunicação sempre no local de maior concentração de veículos *no momento da busca*. A segunda utiliza a heurística do algoritmo GRASP, descrito na seção 4.2.

O cálculo do fluxo de veículos na área urbana foi executado sobre a malha viária que foi dividida em células e representada na forma de grade, conforme mostrado na Figura 1. A Figura 1(a) mostra a malha viária da cidade de Colônia, na Alemanha. A Figura 1(b) divide o mapa em 70×70 células enquanto a Figura 1(c) considera uma grade de 20×20 células urbanas. Conforme se aumenta o número de células urbanas, aumenta-se a precisão da estratégia e conseqüente aumenta-se o custo computacional da solução proposta. O detalhamento da metodologia de extração de informações de mobilidade, bem como a descrição do método de instalação de grades (*grid*), além do cálculo tratamento dos dados disponibilizados por simuladores, encontram-se descritos detalhadamente em [Silva et al. 2014], [Silva et al. 2015] e [Silva et al. 2016].

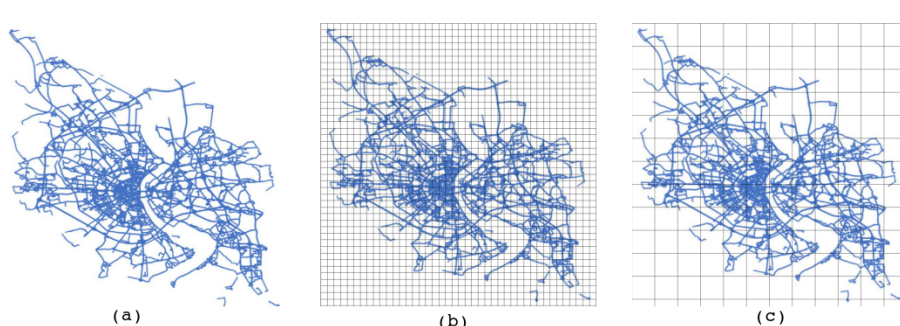


Figura 1. Grade (*grid*) aplicada sobre a malha viária de Colônia, Alemanha. A Figura 1 (a) apresenta o mapa viário da Cidade de Colônia-Alemanha. A Figura 1 (b) divide a cidade em 70×70 células urbanas. A Figura 1 (c) divide a cidade em 20×20 células urbanas.

As estratégias estudadas ao longo do trabalho utilizam a malha viária de Colônia, representada em uma grade de tamanho 100×100 , resultando em 10 mil células. Cada célula ocupa uma área correspondente a $270\text{m} \times 200\text{m}$. Apesar de um alto número de células, as estratégias só realizam alocação nas células que possuem tráfego de veículos, sendo essa característica observada em aproximadamente metade das células, em uma frota circulante de 75.516 veículos avaliados. Todas as estratégias desenvolvidas neste trabalho recebem como entrada o rastro de mobilidade (T), o número de células onde ocorre a deposição de UC (ρ) e o parâmetro (τ), que representa o intervalo de tempo em que um veículo deve interceptar uma área com cobertura, a partir do momento que inicia sua trajetória.

4.1. Solucionando a Deposição Primária com uma estratégia gulosa

O algoritmo 1 apresenta a estratégia gulosa. Quando este algoritmo é iniciado, o conjunto de células cobertas é criado e encontra-se vazio (linha 1). Enquanto o número de veículos pertencente ao conjunto solução (S) for menor que (ρ), o algoritmo calcula a quantidade de veículos cobertos em ($C_{x,y}$), extrai a célula com o maior fluxo de veículos e a insere no conjunto solução (S). Todos os veículos cobertos por ($C_{x,y}$) são excluídos do rastro de mobilidade (T). Esse processo tem como entrada o percentual de (ρ) UC depositadas em células responsáveis pelo alcance de uma quantidade de veículos. O que corresponde a um percentual de cobertura da frota urbana. O tempo avaliado a cada solução é composto pelo tempo de permanência do veículo na célula adicionado ao tempo de saída do veículo desde o instante que inicia seu itinerário (τ). Esse processo é iterado até que a lista de todas as células seja percorrida completamente.

Algoritmo 1 Estratégia Gulosa para Solução da Deposição Primária

entrada: T, ρ, τ, G ; \triangleright recebe o rastro de veículos T , a quantidade de células que podem ser cobertas, o limiar de tempo até o primeiro contato V2I e as dimensões da grade urbana

saída: S \triangleright conjunto solução contendo ρ células cobertas

- 1: $S \leftarrow \emptyset$;
- 2: **enquanto** $|S| < \rho$ **faça**
 - $C_{x,y} \leftarrow \text{calcula_quantidade_veiculos_cobertos}(T, \tau, x, y)$
 - $c \leftarrow \text{Max}(C)$
 - $S \leftarrow S + c$
 - $T \leftarrow T - \text{veiculos_cobertos}(T, S)$ \triangleright Remova veículos cobertos do Trace T
- 3: **fim enquanto**
- 4: **retorne** S ;

4.2. Melhorando a solução da Deposição Primária através da estratégia GRASP

A estratégia GRASP é um método amplamente utilizado em problemas de otimização combinatória que combina a busca gulosa com elementos aleatórios a fim de encontrar soluções de alta qualidade. Funciona iterativamente, selecionando uma solução inicial aleatória e, em seguida, utilizando uma heurística gulosa para melhorar essa solução. Essa estratégia revela-se como uma ferramenta eficiente para resolver problemas de otimização combinatória, como nesse caso, a deposição de unidades de comunicação para conectar a maior quantidade de veículos que entram em uma malha viária.

A parte aleatória da heurística é introduzida por meio de uma Lista Restrita de Candidatos (LRC), permitindo uma escolha randômica entre opções promissoras. A cada iteração, o algoritmo seleciona e ordena as células com maior quantidade de veículos confeccionando uma LRC, mais populares e escolhe aleatoriamente uma das células dessa lista. Ao longo das iterações, o GRASP ajusta os critérios de escolha dos candidatos para direcionar a busca para regiões mais promissoras do espaço de solução, alcançando resultados competitivos em um amplo espectro de problemas de otimização combinatória.

Pela própria natureza da implementação do algoritmo, para que uma determinada célula receba a implantação de uma UC, duas ações são relevantes: a célula em questão foi escolhida dentre uma LRC e os veículos que a ela pertencem são retirados das iterações seguintes. Consequentemente ao se escolher uma célula candidata, e proceder a implantação, todas as células adjacentes terão o número de veículos subtraídos. Essa abordagem balanceia a exploração do espaço de busca, garantindo diversidade, com a intensificação da busca por soluções ótimas ou próximas do ótimo local. No caso da implementação aqui apresentada, a fase de busca local foi suprimida com o objetivo de melhorar especificamente a eficiência do processo de utilização da LRC. Com a eliminação do procedimento de busca local, essencialmente, esta heurística aproxima-se da gulosa, descrita na seção anterior, exceto pela adoção da LRC.

O algoritmo 2 inicia-se com a seleção de um local para a instalação de uma UC. Isso se dá pela escolha aleatória de um “candidato promissor” na LRC composta por células ($C_{x,y}$), fornecidas como parâmetros de entrada, juntamente ao número de veículos pertencentes à célula e o tempo em que cada veículo permaneceu naquela célula. Enquanto o número de veículos pertencente ao conjunto solução (S) for menor que $|\rho|$: O algoritmo calcula a quantidade de veículos cobertos ($C_{x,y}$) e cria uma LRC a partir das células que tenham o maior número de veículos (candidatos com maior pontuação).

Depois escolhe aleatoriamente um candidato (c) da LCR, adiciona-o a (S), retira do traço (T) os veículos que pertencem a ($C_{x,y}$) e itera até que a condição $|S| < |\rho|$ seja satisfeita.

Esta abordagem inicial aleatória é crucial, pois impede que a busca se limite a uma região específica do espaço de soluções, permitindo a exploração de uma variedade de possíveis localizações, o que incentiva a avaliação de alternativas que possam oferecer uma cobertura mais ampla e eficiente.

Algoritmo 2 Estratégia GRASP

entrada: $T, \rho, \tau, G, rcl, iter;$ \triangleright recebe o rastro de veículos T , a quantidade de células que podem ser cobertas, o limiar de tempo até o primeiro contato V2I e as dimensões da grade urbana, o tamanho da LCR, a quantidade de iterações GRASP.

saída: S \triangleright conjunto solução contendo (ρ) de células cobertas

- 1: $maxS \leftarrow \emptyset;$
- 2: **repita**
- 3: $S \leftarrow \emptyset;$
- 4: **enquanto** $|S| < \rho$ **faça**
 - $C_{x,y} \leftarrow \text{calcula_quantidade_veiculos_cobertos}(T, \tau, x, y)$
 - $lista_restrita_candidatos \leftarrow \text{Max}(C, rcl)$ \triangleright Obtém os candidatos com maior pontuação
 - $c \leftarrow \text{escolhe_candidato_aleatorio}(lista_restrita_candidatos)$
 - $S \leftarrow S + c$
 - $T \leftarrow T - \text{veiculos_cobertos}(T, S)$ \triangleright Remova veículos cobertos do Trace T
- 5: **fim enquanto**
- 6: **se** $\text{cobertura}(S) > \text{cobertura}(maxS)$ **então**
- 7: $maxS \leftarrow S$
- 8: **fim se**
- 9: **enquanto** número de iterações $< iter$
- 10: **retorne** $maxS;$

Após esta escolha inicial, o GRASP utiliza uma heurística gulosa para refinar a solução. Um elemento crucial do GRASP é seu ajuste adaptativo. À medida que o processo avança, o sistema exclui os veículos das localizações anteriormente selecionadas ajustando assim os critérios para escolher novos locais nas iterações subsequentes. Esta capacidade de adaptação e aprendizado com experiências passadas é fundamental para aprimorar continuamente as soluções de deposição de unidades de comunicação.

Além disso, o GRASP equilibra de maneira eficaz a exploração de novas localizações com a intensificação da busca pelas melhores soluções. Isso significa alternar entre: testar diferentes locais para as unidades de comunicação e focar naqueles que demonstram maior potencial de conectividade. Esse balanceamento ajuda a garantir que a solução final não seja apenas eficaz em um contexto local, mas também em uma perspectiva global. No caso da Deposição Primária, isto envolve a escolha de uma LCR, ordenada pela quantidade de veículo que a possam alcançar cada célula.

Um novo processo análogo ao descrito repete-se a cada iteração até que todas as UC sejam alocadas nas células (x, y) da grade que representa a malha viária da cidade em exame. A saída do algoritmo fornece o percentual de cobertura da frota urbana para cada solução, o tempo demandado para a realização de cada busca e a posição das células onde foram depositadas UC. Das células que possuem tráfego de veículos, aproximadamente 50% possuem tráfego nulo ou pequeno, de forma que alocar unidades de comunicação nessas células não resulta em ganho viável, visto o aumento do espaço de busca.

5. *Baseline*: Alocando Unidades de Comunicação nas Células mais Populares

Para avaliar o desempenho das estratégias propostas, inicialmente definimos como métrica a comparação dos resultados obtidos com a estratégia intuitiva de alocar unidades de comunicação nos pontos de maior concentração de veículos.

O algoritmo 3 recebe como entrada o rastro de mobilidade (T), o número desejável de células que as unidades de comunicação serão depositadas (ρ) e o intervalo de tempo (τ) que computa o tempo de permanência do veículo em cada célula que o mesmo já esteve em T . Essa estratégia nos possibilita calcular o intervalo de tempo desde que o veículo inicia sua trajetória até entrar em uma célula cuja UC tenha sido depositada. Seu funcionamento é apresentado a seguir: Ordene (T) obtendo (T') e a partir deste, selecione os (ρ) primeiros elementos, obtendo (Υ).

Algoritmo 3 Alocar Unidades de Comunicação nas Áreas mais Populares

entrada: T, ρ ;

saída: Υ ;

1: $T' \leftarrow \text{ordene}(T)$;

▷ ordene células conforme volume de tráfego

2: $\Upsilon \leftarrow \text{seleçione_primeiros_elementos}(T', \rho)$;

▷ obtenha as primeiras células de T'

3: **retorne** Υ ;

6. Resultados

Esta seção apresenta os experimentos realizados ao longo desse trabalho. A seção 6.1 apresenta a comparação da quantidade de veículos que é coberta ao se realizar a deposição utilizando-se as duas estratégias. A estratégia *baseline* foi usada como métrica para qualificar os resultados apresentados. A seção 6.2 compara a solução gulosa com a solução GRASP para a Deposição Primária. A seção 6.3 realiza uma avaliação da estratégia GRASP. A seção 6.4 mostra as diferenças de alocações de UC em alguns cenários.

6.1. Veículos atingidos: solução gulosa *versus* estratégia intuitiva

Esse experimento compara a quantidade de veículos cobertos, considerando o rastro de mobilidade de Colônia, Alemanha [Uppoor and Fiore 2012]. As UC são alocadas de acordo com a Deposição Primária resolvida através de um algoritmo guloso e comparado ao *baseline* (UC nos locais de maior fluxo de veículos). A Figura 2 sumariza os resultados obtidos. As Figuras 2(a) e 2(c) apresentam o percentual de veículos cobertos no eixo y , bem como o percentual de cobertura da malha viária no eixo x . A curva laranja apresenta a solução gulosa criada para a Deposição Primária, enquanto a azul apresenta o resultado da heurística *baseline*: alocar as UC nas células urbanas de maior fluxo de veículos.

As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam o cenário onde o tempo limite para o veículo atingir a primeira área de cobertura é de 30s, enquanto as Figuras 2(c) e 2(d) consideram este tempo como sendo 60s. Observando-se a Figura 2(a), nota-se que a Deposição Primária apresenta um percentual de cobertura sempre maior que o *baseline*. Os ganhos da Deposição Primária são apresentados na Figura 2(b), variando de 50% à 200% na quantidade de veículos cobertos em relação ao *baseline*. O cenário de tempo limite de conexão de 60s apresenta ganhos semelhantes representados nas Figuras 2(c) e 2(d).

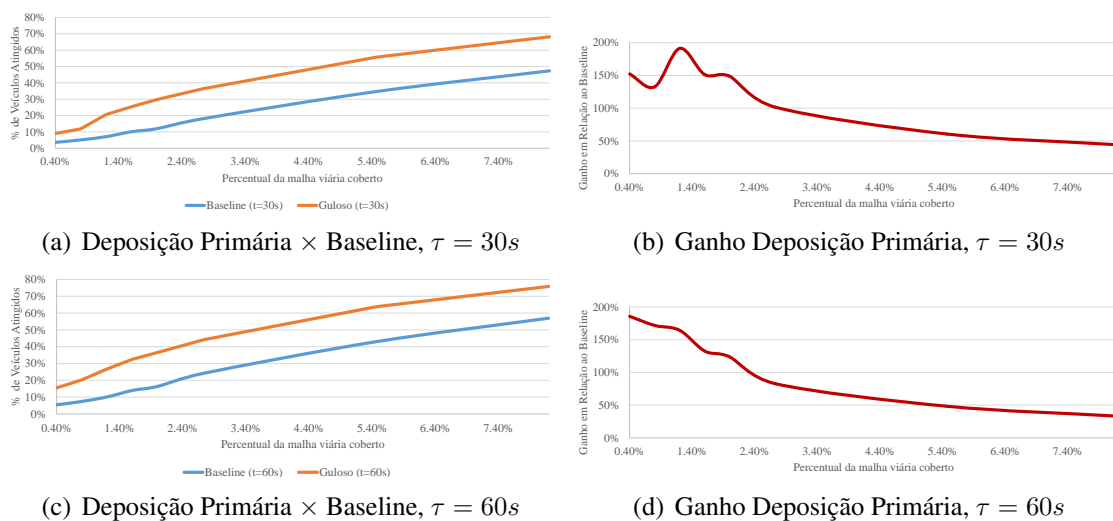


Figura 2. Quantidade de veículos que atingem seu primeiro contato no limite de tempo τ . As Figuras (a) e (b) apresentam o cenário $\tau = 30s$, as Figuras (c) e (d) o cenário para $\tau = 60s$. As Figuras (b) e (d) apresentam o ganho da Deposição Primária resolvida pelo algoritmo guloso versus a *baseline*.

6.2. Comparando a solução gulosa com a solução GRASP

A Figura 3(a) apresenta uma comparação entre a quantidade de veículos cobertos pelas estratégias gulosa e GRASP para a solução da Deposição Primária, bem como a solução obtida pelo *baseline*, i.e., a estratégia intuitiva de alocar cobertura nas áreas de maior fluxo de veículos. Já a Figura 3(b) apresenta o ganho percentual de cada estratégia GRASP em relação à estratégia gulosa. Foram realizadas 20 mil iterações considerando-se a LRC de tamanho 5, 10 e 15. Ao se analisar esta figura, notamos que os ganhos da estratégia GRASP foram de 1.57% até 3.01% para esse cenário. Este ganho pode ser ampliado pela execução de mais iterações ou aumento no tamanho da LRC.

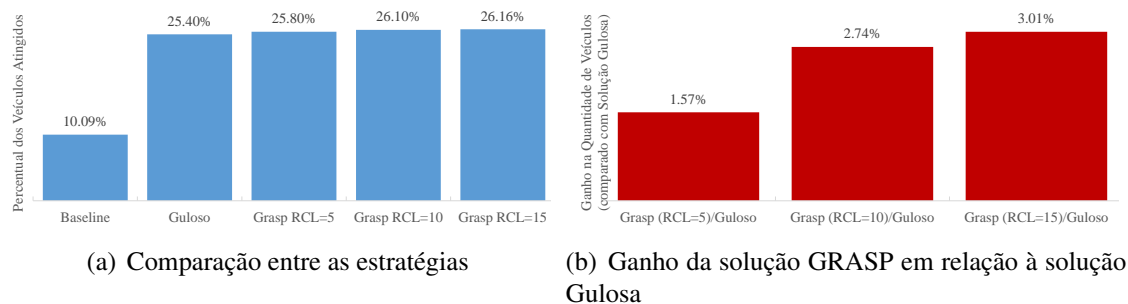


Figura 3. A Figura (a) apresenta o % de veículos alcançáveis nas estratégias implementadas, considerando o cenário $\rho = 1.6\%$ da malha viária e tempo de contato de $\tau = 30s$. A Figura (b) apresenta o ganho da solução GRASP em relação à solução gulosa para LRC iguais à {5,10,15}.

Ambas as Figuras 3(a) e 3(b) apresentam o cenário de cobertura de $\rho = 1.6\%$ da malha viária e tempo limite de contato de $\tau = 30s$. Na Figura 3(a), o eixo y apresenta o percentual da frota que conseguiu chegar a uma área de cobertura dentro do limite de tempo de $\tau = 30s$.

Já a Figura 3(b) apresenta o ganho percentual de cada estratégia GRASP em relação à estratégia gulosa. Foram realizadas 20 mil iterações considerando-se a LRC de tamanho 5, 10 e 15. Ao se analisar esta figura, notamos que os ganhos da estratégia GRASP foram de 1.57% até 3.01% para esse cenário. Este ganho pode ser ampliado pela execução de mais iterações ou aumento no tamanho da LRC.

6.3. Avaliação da estratégia GRASP para solução da Deposição Primária

As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) apresentam a evolução da melhor solução ao longo das 20 mil iterações do GRASP (linha contínua) considerando-se o cenário de cobertura de $\rho = 1.6\%$ da malha viária e tempo limite de contato de $\tau = 30s$. A diferença entre elas é o tamanho da LRC. A Figura 4(a) considera a lista restrita de tamanho 5, a Figura 4(b) de tamanho 10, enquanto a Figura 4(c) com tamanho 15. Nessas figuras, o eixo y apresenta o percentual de veículos atingidos; o eixo x : iterações GRASP.

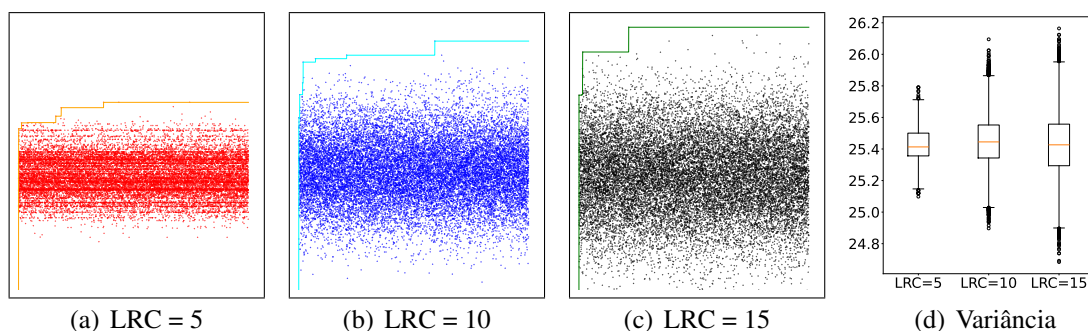


Figura 4. As figuras (a)-(c) apresentam a evolução da melhor solução obtida ao longo de 20 mil iterações GRASP. Ambas tem o eixo $x=[0,20.000]$ iterações e $y=[24.8,26.2]$ (%) da frota urbana coberta. A figura (d) mostra uma medida de dispersão das três curvas anteriores.

Optamos por seleccionar uma quantidade pequena de células para evidenciar o potencial de alta cobertura a partir de uma mínima infraestrutura depositada. A melhoria alcançada pela aplicação da heurística GRASP reside justamente na aleatoriedade da busca no espaço de soluções. Quanto maior a LRC, mais provável que exista árvores de soluções inéditas, representadas na Figura 4(d) como *outliers*. A medida de dispersão IQR (Intervalo Interquartil)³ resultou nos valores de 0.14, 0.21 e 0.24 referentes a LRC de tamanhos 5, 10 e 15 candidatos respectivamente. Como era previsto, houve uma variação crescente do IQR ao aumento da LRC.

6.4. Deposição Primária: visualização dos resultados em mapas

A Figura 5 mostra os locais onde as UC são depositadas, resultante da aplicação das estratégias utilizadas para resolver a Deposição Primária, a saber: gulosa e GRASP, sempre referenciadas a estratégia intuitiva ou *baseline*. Os cenários escolhidos para essa seção 6.4 mostram a ocupação de 30 e 90 células da grade de divisão da cidade, que representam $\rho = 0,4\%$, e $\rho = 1,2\%$ da área urbana total.

³Intervalo Interquartil: é uma medida de dispersão estatística calculada como a diferença entre o terceiro quartil (Q3) e o primeiro quartil (Q1) em um conjunto de dados.

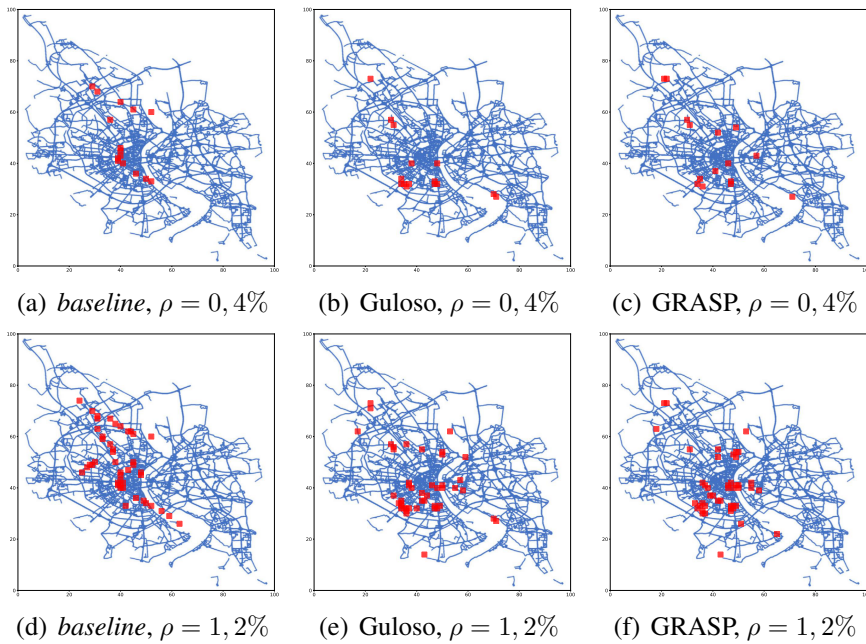


Figura 5. Deposição das UC nos cenários de 0.4 e 1.2% na malha rodoviária da cidade de Colônia: *baseline*, gulosa e GRASP, respectivamente.

Embora haja alguma imprecisão na posição exata de cada célula devido a erro de paralaxe (uma vez que a grade selecionada para a mera visualização apresente uma trama quadrada, enquanto as células utilizadas neste trabalho, retangulares), podemos perceber visualmente as diferenças entre cada estratégia nos cenários propostos. Se compararmos as Figuras 5(a) e 5(d) podemos perceber que a estratégia intuitiva incrementa $|\rho_5 - \rho_{15}|$ novas células, na solução anterior. Em outras palavras, a solução para ρ_{15} contém a solução para ρ_5 . A quantidade de veículos atingidos pela solução *baseline* e pelas heurísticas gulosa e GRASP foi de 19.42%, 20.11% e 21.05% da frota.

Ao compararmos mostrado na Figura 5(b) percebemos que a implantação de UC já reflete um perfil de “espalhamento” quando comparado à deposição *baseline* Figura 5(a) que acompanha as vias de maior fluxo. Inspecionando as Figuras 5(b) e 5(e), pode-se perceber que a solução através do algoritmo guloso resulta em uma melhor distribuição de UC. Isso é devido a lógica de implementação do algoritmo que revela a eficácia da estratégia de retirar do *trace* as células e veículos selecionadas, impondo uma distribuição mais homogeneia de células. Já nas Figuras 5(c) e 5(f) as células contidas na solução de cada cenário, ρ_n , podem ser totalmente diferentes de outro cenário ρ_{n+1} . Isso ocorre porque a estratégia GRASP aleatoriza a seleção das células através da LRC. Uma solução para $\rho = 0,4\%$ [fig. 5(c)] e $\rho = 1,2\%$ [fig. 5(f)] podem ser constituídas de células completamente diferentes. Se observarmos os resultados introduzidos pela aleatoriedade inserida na heurística GRASP (pela LRC) vemos uma solução mais próxima a ótima.

7. Conclusão

O presente trabalho apresenta a Deposição Primária, uma estratégia para alocação inicial de UC em redes veiculares com o objetivo de identificar os pontos de entrada de tráfego na malha viária. Esses pontos são fundamentais para o controle da capacidade do sistema viário e do sistema de comunicações.

Os experimentos foram conduzidos levando em consideração o rastro realístico de mobilidade veicular da cidade de Colônia, Alemanha. A malha viária foi particionada em forma de grade em um total de de 100×100 , por onde trafegaram os mais de 75 mil veículos. Os resultados demonstram que a estratégia intuitiva de alocação de UC nos locais de maior densidade de veículos não é eficaz para a solução deste problema. Diante disso, propusemos um algoritmo guloso e um GRASP para a solução deste problema NP-Hard. A estratégia gulosa consegue aumentar a quantidade de veículos atingindo uma área de cobertura até o limite (τ) de 50% à 200%, dependendo do cenário em análise. Já a estratégia GRASP executada com 20 mil iterações aumenta a quantidade de veículos experimentando essa cobertura inicial em até 3%. Naturalmente, aumentando-se o número de iterações e variando-se o tamanho da LRC, pode-se aumentar a eficiência do método GRASP.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) projetos (305381/2020-2 e 304946/2023-0), CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), a FAPESP/MCTI (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e Ministérios de Ciência e Tecnologia através do processo 2020/05182-3 e a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) projeto APQ-01135-21.

Referências

- [Bastos et al. 2018] Bastos, A. V., Silva, C. M., and da Silva, D. C. (2018). Assisted routing algorithm for d2d communication in 5g wireless networks. In *2018 Wireless Days (WD)*, pages 28–30.
- [Bazzi et al. 2011] Bazzi, A., Masini, B. M., and Andrisano, O. (2011). On the frequent acquisition of small data through rach in umts for its applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(7):2914–2926.
- [Cataldi and Harri 2011] Cataldi, P. and Harri, J. (2011). User/operator utility-based infrastructure deployment strategies for vehicular networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*, pages 1–5.
- [Guidoni et al. 2022] Guidoni, D. L., Gottsfriz, E. N., Meneguette, R. I., Silva, C. M., Filho, G. P. R., and Souza, F. S. H. (2022). Toward an efficient data dissemination protocol for vehicular ad-hoc networks. *IEEE Access*, 10:123711–123722.
- [Lu et al. 2014] Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X., and Mark, J. W. (2014). Connected vehicles: Solutions and challenges. *IEEE internet of things journal*, 1(4):289–299.
- [Resende and Ribeiro 2016] Resende, M. G. and Ribeiro, C. C. (2016). *Optimization by GRASP*. Springer.
- [Silva et al. 2014] Silva, C. M., Aquino, A. L. L., and Meira Jr, W. (2014). Design of roadside infrastructure for information dissemination in vehicular networks. In *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE*, pages 1–8.
- [Silva et al. 2015] Silva, C. M., Aquino, A. L. L., and Meira, Jr, W. (2015). Deployment of roadside units based on partial mobility information. *Computer Communications*, 60(0):28 – 39.

- [Silva et al. 2017a] Silva, C. M., Masini, B. M., Ferrari, G., and Thibault, I. (2017a). A Survey on Infrastructure-Based Vehicular Networks. *Mobile Information Systems*, 2017, Article ID 6123868:28–56.
- [Silva et al. 2016] Silva, C. M., Meira, W., and Sarubbi, J. F. M. (2016). Non-intrusive planning the roadside infrastructure for vehicular networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(4):938–947.
- [Silva et al. 2021] Silva, C. M., Santos, L. A. L., Sumika, F. S. H., Mokhtari, S., Guidoni, D. L., and Nogueira, J. M. S. (2021). Omega deployment: Designing the communication roadside infrastructure for vehicles ensuring minimum qos levels of connectivity during fluctuations of the vehicles flow. In *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6.
- [Silva et al. 2023] Silva, C. M., Sarubbi, J. F. M., Mokhtari, S., Santos, L. A. L., Silva, L. D., Souza, F. S. H., Guidoni, D. L., and Nogueira, J. M. S. (2023). Rage: A novel strategy for solving non-polynomial problems through the random generation of solutions and incremental reduction of the number of candidates: A case study applied to the design of the network infrastructure for connected vehicles. *Expert Systems with Applications*, 213:118900.
- [Silva et al. 2017b] Silva, C. M., Silva, F. A., Sarubbi, J. F., Oliveira, T. R., Meira Jr, W., and Nogueira, J. M. S. (2017b). Designing mobile content delivery networks for the Internet of vehicles. *Vehicular Communications*, 8:45 – 55. Internet of Vehicles.
- [Silva et al. 2019] Silva, C. M., Silva, L. D., Santos, L. A. L., Sarubbi, J. F. M., and Pitsillides, A. (2019). Broadening understanding on managing the communication infrastructure in vehicular networks: Customizing the coverage using the delta network. *Future Internet*, 11(1).
- [Swain et al. 2018] Swain, P., Christophorou, C., Bhattacharjee, U., Silva, C. M., and Pitsillides, A. (2018). Selection of ue-based virtual small cell base stations using affinity propagation clustering. In *2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pages 1104–1109. IEEE.
- [Trullols et al. 2010] Trullols, O., Fiore, M., Casetti, C., Chiasserini, C.-F., and Ordinas, J. B. (2010). Planning roadside infrastructure for information dissemination in intelligent transportation systems. *Computer Communications*, 33(4):432–442.
- [Uppoor and Fiore 2012] Uppoor, S. and Fiore, M. (2012). A large-scale vehicular mobility dataset of the Cologne urban area. In *14èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (AlgoTel)*, pages 1–4, Hérault, France, France.
- [Uppoor et al. 2014] Uppoor, S., Trullols-Cruces, O., Fiore, M., and Barcelo-Ordinas, J. M. (2014). Generation and analysis of a large-scale urban vehicular mobility dataset. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(5):1061–1075.
- [Zheng et al. 2009] Zheng, Z., Sinha, P., and Kumar, S. (2009). Alpha coverage: Bounding the interconnection gap for vehicular internet access. In *IEEE INFOCOM 2009*, pages 2831–2835. IEEE.