

# Uma Abordagem Baseada em RTT para Agrupamento Estável e de Baixa Latência em VANETs

Santiago Cardoso<sup>1</sup>, Adriano Fiorese<sup>1,2</sup>, Guilherme Piêgas Koslovski<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação - DCC  
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Joinville, SC – Brasil

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCAP)  
Departamento de Ciência da Computação - DCC  
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Joinville, SC – Brasil

santiago.cardoso@edu.udesc.br, {adriano.fiorese, guilherme.koslovski}@udesc.br

**Abstract.** *Clustering strategies in Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) often overlook latency by prioritizing mobility metrics. This work proposes a clustering algorithm based on Round-Trip Time (RTT), focused on ensuring low-latency and high-stability Vehicle-to-Vehicle (V2V) communications. Through the implementation of heuristics, the mechanism resolves common election and resignation conflicts in vehicular scenarios. Simulations demonstrate that the proposed solution offers superior cluster durability and lower control overhead compared to the Lowest-ID (LID) algorithm, establishing itself as a robust alternative for information dissemination in VANETs.*

**Resumo.** *Estratégias de agrupamento (clustering) em Redes Veiculares Ad Hoc (VANETs) frequentemente negligenciam a latência ao priorizar métricas de mobilidade. Este trabalho propõe um algoritmo de agrupamento baseado no Tempo de Ida e Volta (RTT) de pacotes de dados, focado em assegurar comunicações Veículo-para-Veículo (V2V) de baixa latência e alta estabilidade. Através da implementação de heurísticas, o mecanismo resolve conflitos comuns de eleição e renúncia em cenários veiculares. Simulações demonstram que a solução proposta oferece uma durabilidade de cluster superior e menor carga de controle frente ao algoritmo Menor ID (LID), consolidando-se como uma alternativa robusta para a disseminação de informações em VANETs.*

## 1. Introdução

O crescente número de veículos circulando nas vias, especialmente em grandes centros urbanos e rodovias, tornou a mobilidade cada vez mais complexa e propensa a interrupções [Damjanović et al. 2022]. Situações como acidentes, congestionamentos e outros incidentes surgem com frequência, exigindo muitas vezes uma resposta imediata devido aos riscos potenciais apresentados aos usuários das vias. A comunicação confiável e oportuna desses eventos é essencial para que os condutores tomem decisões informadas para mitigar seus impactos. Em resposta, tecnologias de comunicação inteligentes estão sendo empregadas para identificar e disseminar informações sobre tais eventos.

Uma solução promissora para os desafios de disseminar informações sobre eventos críticos urbanos de trânsito reside na formação espontânea de redes de comunicação

entre veículos. Essas redes, conhecidas como Redes Veiculares *Ad Hoc* (VANETs), são sistemas de comunicação móvel que permitem a troca de informações entre veículos [Tomar et al. 2010]. As VANETs facilitam o monitoramento e o alerta de eventos críticos de trânsito em ambientes urbanos, permitindo que os usuários das vias recebam atualizações oportunas sobre situações de perigo.

As comunicações dentro das VANETs exigem a troca constante de informações. Para dar suporte a isso, estratégias de comunicação envolvendo Veículo-para-Veículo (V2V) e agrupamento (*clustering*) de veículos [Andrade et al. 2020] são identificadas como soluções eficazes [Tomar et al. 2010].

Além disso, as VANETs são consideradas uma tecnologia fundamental para diversos campos, incluindo sistemas de transporte inteligentes, que exigem constantemente a operação de VANETs devido à troca de informações em tempo real necessária para a tomada de decisões eficientes e precisas de forma rápida.

Apesar de sua importância, as abordagens atuais de agrupamento em VANETs apresentam limitações. Devido à topologia altamente dinâmica e à constante movimentação dos veículos na rede, muitos métodos tradicionais sofrem com instabilidades dos *clusters*, o que leva a reeleições constantes de veículos Líder de *Cluster* (*Cluster Head*) (CH) e gera uma alta sobrecarga de mensagens de controle. Além disso, as soluções existentes apresentam dificuldade em se adaptar rapidamente a variações nas condições de tráfego de dados, comprometendo a entrega de informações sensíveis ao atraso.

Dada a estrutura e o grande número de veículos em uma VANET, os critérios utilizados para formar grupos de veículos são críticos. Muitos algoritmos convencionais de agrupamento para VANETs priorizam métricas de mobilidade, como velocidade, direção e posição do veículo [Cooper et al. 2017]. Embora essas métricas possam ajudar a prever a longevidade de uma conexão, elas são indicadores indiretos do desempenho real da comunicação. Consequentemente, *clusters* formados apenas com base na mobilidade ainda podem sofrer com alta latência ou instabilidade devido às condições da rede em tempo real. Isso destaca a necessidade de uma abordagem de agrupamento baseada em uma métrica que reflita diretamente a qualidade e a velocidade atuais da rede.

Portanto, este trabalho propõe um mecanismo de agrupamento dinâmico baseado na métrica Tempo de Ida e Volta (RTT), para o agrupamento estável de veículos com comunicação de baixa latência. Para realizar isso, introduzem-se a implementação e a análise comparativa de um algoritmo RTT base, duas variações aprimoradas projetadas para estabilidade e uma abordagem clássica de agrupamento Menor ID (LID) como ponto de referência. Essas variações incorporam heurísticas projetadas especificamente para melhorar a estabilidade do *cluster* e a eficiência da comunicação, demonstrando seus benefícios significativos em relação a uma abordagem puramente baseada em RTT.

Com base nestes tópicos, este trabalho visa responder às seguintes perguntas: Quão eficaz é o RTT como métrica primária para a formação dinâmica de *clusters* em VANETs? Como os *clusters* baseados em RTT impactam métricas de desempenho fundamentais, como latência e estabilidade do *cluster*? E até que ponto heurísticas focadas em estabilidade podem melhorar o desempenho de um algoritmo de agrupamento puramente baseado em RTT? Nesse sentido, o objetivo principal deste estudo é desenvolver e

validar a criação e aplicação da abordagem de agrupamento baseada em RTT dentro de uma VANET, permitindo a criação de *clusters* que garantam uma comunicação estável e de baixa latência para disseminar informações de forma eficaz.

Dessa forma, o restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 detalha a fundamentação teórica para VANETs. A Seção 3 revisa a literatura existente sobre metodologias de agrupamento em VANETs. A Seção 4 detalha a arquitetura de agrupamento baseada em RTT proposta, descrevendo sua formulação, algoritmos e as heurísticas sugeridas para melhorar a estabilidade e a latência. A Seção 5 apresenta a configuração da simulação e avalia o desempenho da abordagem de agrupamento baseada em RTT em comparação com um algoritmo de agrupamento LID tradicional, bem como os benefícios de cada heurística. Finalmente, a Seção 6 conclui o trabalho e apresenta sugestões para melhorias futuras.

## 2. Redes VANETs

As VANETs são um segmento especializado das Redes Móveis *Ad Hoc* (MANETs) descentralizadas e auto-organizadas, que são redes sem fio de múltiplos saltos que não requerem infraestrutura preliminar para disseminar informações entre dois nós do sistema [Toh 2001, Cunha et al. 2016]. Dentro do ambiente em evolução da Internet dos Veículos (IoV), veículos equipados com computação de bordo (sensores, sistemas de navegação, câmeras, etc.) operam como roteadores cooperativos para facilitar o monitoramento e a disseminação espontânea de informações [Datta et al. 2017]. Esta arquitetura é uma tecnologia fundamental para os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS), pois aumenta a segurança no trânsito, melhora a eficiência do transporte e permite a implantação de novos serviços veiculares (navegação avançada, gestão de tráfego em tempo real, etc.).

Para que tal capacidade de comunicação de informações ocorra entre os veículos, a arquitetura V2V é utilizada na VANET. Neste modelo de comunicação, a rede opera de maneira *ad hoc*. Os veículos pertencentes à VANET transmitem informações diretamente para outros veículos próximos, sem a necessidade de infraestrutura de suporte fixa [Cunha et al. 2016]. A comunicação V2V permite a criação de um ambiente de direção cooperativa, possibilitando a disseminação de alertas de baixa latência sobre acidentes, condições adversas da via ou frenagens bruscas de outros condutores. Essa capacidade de comunicação direta é um elemento crucial para as VANETs, pois permite que os veículos tomem decisões proativas, ajustando seus comportamentos e rotas para mitigar riscos em tempo real e aumentar a segurança de todos que estão nas vias ou rodovias.

Nesse sentido, as técnicas de agrupamento estão diretamente relacionadas à comunicação V2V. Ao utilizar as capacidades dos veículos de disseminar informações na rede, esquemas de agrupamento são empregados para apoiar a disseminação de informações e o rastreamento de elementos na VANET [Yury et al. 2020].

## 3. Trabalhos Relacionados

Esta seção discute os trabalhos relacionados, contextualizando nossa contribuição no tema das técnicas de agrupamento de veículos em VANETs.

[Nawej et al. 2025] realiza uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre técnicas de agrupamento para a otimização de redes heterogêneas e dinâmicas, abran-

gendo cenários 5G, Internet das Coisas (IoT), e VANETs. Os autores analisaram 40 estudos recentes, categorizando as técnicas utilizadas com base em suas respectivas abordagens de agrupamento, como: espectral; por densidade; e aprendizado profundo. A RSL evidencia uma tendência de migração de métodos tradicionais para abordagens mais sofisticadas capazes de lidar com a alta mobilidade de usuários e os requisitos de Qualidade de Serviço (QoS). Contudo, aponta que a complexidade computacional desses algoritmos dificulta a implementação prática em ambientes voláteis. Em contrapartida, este trabalho propõe uma abordagem baseada no RTT das mensagens de controle, priorizando uma métrica direta e de baixo custo de processamento para garantir estabilidade e baixa latência na formação dos *clusters* sem a sobrecarga de métodos complexos.

[Kumar and Raw 2025] apresenta o protocolo MC<sup>2</sup>R para roteamento baseado em *clusters* em Redes Veiculares Definidas por Software (SD-VANET). A proposta do trabalho visa descentralizar as decisões de roteamento para aliviar o *overhead* nas Unidades de Beira de Estrada (RSUs). Métodos de Decisão Multicritério (MCDM) são utilizados para identificar o CH a fim de minimizar os custos computacionais desta seleção. Para isso, utiliza-se uma combinação de Processo Hierárquico Analítico (AHP) para a ponderação dos critérios e Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) para ranquear os candidatos. Através dos resultados das simulações realizadas, foi possível identificar que a proposta garante um desempenho promissor em termos de vazão (*throughput*), latência e longevidade do CH. No entanto, a seleção feita é restrita a critérios de natureza exclusivamente física (distância, velocidade, força do sinal, etc.). Em contraste, a proposta deste trabalho visa utilizar um mecanismo de agrupamento da camada de rede baseado em RTT para formar *clusters* estáveis e de baixa latência baseados na métrica RTT.

[Pidy Pidy et al. 2025] propõe o protocolo Roteamento por Colônia de Formigas Baseado em *Clusters* com Líder de *Cluster* Adaptativo (CARAC), que associa o algoritmo K-medoides à Otimização por Colônia de Formigas (ACO) para otimizar rotas, estabilidade e disseminação de dados. O método utiliza proximidade espacial e velocidade relativa para o agrupamento e manutenção adaptativa da rede. Embora supere protocolos clássicos em latência e vazão, o CARAC exige processos de roteamento complexos e custosos. Diferentemente, a proposta deste trabalho simplifica o processo ao utilizar o RTT como métrica direta da camada de rede, evitando a sobrecarga em cenários de altíssima mobilidade. Ademais, os autores observam que simulações em ambientes controlados podem não reproduzir fielmente variações de terreno e obstáculos urbanos, lacuna que este trabalho busca mitigar ao empregar o projeto Luxembourg SUMO Traffic (LuST) para simular a geometria viária real da cidade de Luxemburgo.

Assim, a abordagem proposta neste trabalho busca fornecer uma nova alternativa para as metodologias de agrupamento, visando contribuir para o desenvolvimento de um sistema mais eficiente para o problema de agrupamento de veículos dentro da rede. Para conseguir isso, os veículos para o agrupamento são selecionados com base no RTT das mensagens de controle disseminadas, garantindo que os veículos formem grupos com baixa latência e alta conectividade.

#### 4. Arquitetura de agrupamento baseada em RTT

O algoritmo proposto neste trabalho é um método de agrupamento dinâmico e descentralizado, projetado para formar *clusters* de baixa latência e alta estabilidade em VANETs. A métrica utilizada pelo algoritmo para a formação e manutenção dos *clusters* é o RTT medido entre os veículos. O RTT é uma métrica que mede o tempo que um pacote de dados leva para viajar de um ponto a outro e retornar [Mirkovic et al. 2018].

Para a implementação do algoritmo, os veículos na rede projetada operam em um dos três estados fundamentais propostos abaixo: • **OCIOSO**: Um veículo OCIOSO é um veículo que está procurando por um *cluster* disponível para ingressar; • **CH**: Um veículo CH é um veículo que atua como líder do *cluster*. Isto é, ele controla seu próprio *cluster*, comunicando-se com outros *clusters* e aceitando a entrada de novos membros em seu *cluster*; e • **Membro de Cluster (Cluster Member) (CM)**: Um veículo CM é um veículo que pertence a um *cluster*. Isto é, ele é um membro ativo de um *cluster* na rede.

Dessa forma, para que o algoritmo realize a coordenação entre os veículos na VANET, quatro tipos de mensagens de controle são propostos: • **DESCOBERTA**: Esta mensagem é transmitida, via *broadcast*, pelos CHs e por veículos no estado OCIOSO para anunciar sua presença na rede; • **RESPOSTA**: Esta mensagem é transmitida por veículos no estado OCIOSO como resposta a uma mensagem DESCOBERTA recebida, demonstrando assim seu interesse em ingressar no *cluster* daquele veículo e permitindo que o RTT da comunicação seja calculado; • **CONVITE**: Esta mensagem é um convite enviado pelo CH para veículos no estado OCIOSO para ingressarem em seu *cluster*; e • **CHECAGEM**: Esta mensagem é enviada por um CM ao seu CH a fim de manter a conexão ativa e o *cluster* formado.

A arquitetura base do algoritmo, apresentada na Figura 1, representa o estabelecimento e o crescimento dos *clusters* à medida que mais veículos se juntam ao CH. Dentro do *cluster*, os veículos utilizam a comunicação V2V para trocar informações e, para se comunicar com outros *clusters*, o CH assume o papel de estabelecer a comunicação V2V com outro CH, trocando assim informações entre os *clusters*.

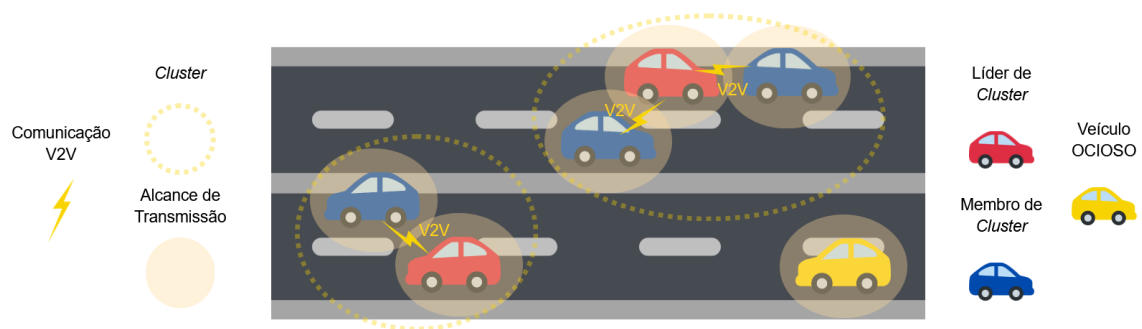


Figura 1. Arquitetura Baseada em RTT.

##### 4.1. Algoritmo RTT Base (RTT-B)

O RTT-B representa a base do algoritmo RTT e de todos os seus processos para a formação de *clusters*. Para isso, o RTT-B pode ser subdividido em cinco etapas: • **Descoberta e Medição de RTT**: Esta é a etapa inicial do algoritmo RTT-B. Nela, veículos nos estados OCIOSO ou CH enviam periodicamente mensagens de DESCOBERTA via *broadcast* em

um intervalo fixo (1.00s em nossa configuração). Estas mensagens contêm o identificador (ID) e o estado atual do remetente. Outros veículos no estado OCIOSO que recebem a mensagem respondem imediatamente com uma mensagem de RESPOSTA, permitindo que o remetente original calcule o RTT da comunicação com base em uma única troca, visando priorizar a capacidade de resposta em topologias altamente dinâmicas; • **Eleição de Líder de Cluster (Cluster Head):** Nesta etapa, se uma única medição de RTT for inferior ao RTT\_THRESHOLD estático (definido pelos requisitos de latência específicos da aplicação), o veículo no estado OCIOSO que iniciou a comunicação proclama-se como um CH. Caso receba múltiplas respostas, ele utiliza a de menor RTT como gatilho. Assim, uma comunicação de baixa latência qualifica um veículo para iniciar um novo *cluster*; • **Formação do Cluster:** Nesta etapa, uma vez que um veículo se torna um CH, ele começa a convidar outros veículos em estado OCIOSO vizinhos simultaneamente para ingressarem em seu *cluster*. O CH envia uma mensagem de CONVITE apenas para veículos que enviaram RESPOSTA com estado OCIOSO e cujo RTT seja inferior ao RTT\_THRESHOLD, garantindo que o *cluster* seja composto apenas por membros que atendam aos requisitos de latência. Se um veículo OCIOSO receber convites simultâneos de diferentes CHs, ele segue uma lógica primeiro a chegar, primeiro a ser servido (FCFS), ingressando no *cluster* da primeira mensagem de CONVITE processada; • **Manutenção do Cluster:** Nesta etapa, o *cluster* já está formado, exigindo estratégias de manutenção. Os CMs enviam periodicamente mensagens de CHECAGEM em *unicast* para seu CH. O CH mantém um mapa de seus membros e remove aqueles de quem não recebe mensagens de CHECAGEM após um certo período (TEMPO\_EXPIRACAO\_VIZINHO). Além disso, se um CM deixar de receber as mensagens de DESCOBERTA periódicas de seu CH pelo período TEMPO\_EXPIRACAO\_VIZINHO, ele considera que a conexão foi perdida e retorna ao estado OCIOSO. O TEMPO\_EXPIRACAO\_VIZINHO é determinado como um múltiplo do intervalo de descoberta (ex: três vezes o INTERVALO\_DESCOBERTA) para garantir estabilidade contra falhas de enlace transitórias e evitar reconexões frequentes devido a mudanças temporárias de mobilidade; e • **Resolução de Conflitos:** Esta é uma regra para resolver situações de conflito em que dois CHs se sobrepõem no *cluster*. Como o processo de eleição pode ocorrer de forma independente, dois veículos próximos podem se tornar CHs simultaneamente. Esses CHs detectam a sobreposição ao receberem as mensagens periódicas de DESCOBERTA um do outro. Assim, a resolução do problema baseia-se no fato de o CH com o ID mais baixo ter prioridade, e o outro renuncia ao seu status, retornando ao estado OCIOSO.

#### 4.2. Algoritmo RTT com Heurística de Hesitação (RTT-H)

A abordagem RTT-B sofre de um problema de instabilidade em cenários densos, nos quais múltiplos veículos no estado OCIOSO podem medir simultaneamente valores baixos de RTT e proclamarem-se como CHs, o que causa um excesso de eleições e renúncias de CH. Assim, o algoritmo RTT-H propõe que, em vez de um veículo OCIOSO se tornar um CH imediatamente ao medir um RTT válido, ele entre em um novo estado de CANDIDATO. Neste estado, o veículo agenda sua promoção a CH para um momento futuro curto e aleatório. Se, durante este período de hesitação, ele detectar um CH já estabelecido ou receber um convite, ele cancela sua própria promoção e ingressa no *cluster* existente. Com esta heurística, os conflitos de eleição são drasticamente reduzidos.

### 4.3. Algoritmo RTT com Heurística de Período de Imunidade (RTT-I)

A abordagem RTT-B sofre de um problema de renúncia prematura por veículos CH, em que um CH recém-eleito pode ser forçado a renunciar imediatamente ao encontrar um CH com um ID mais baixo, mesmo que o outro CH esteja na borda da rede ou prestes a se desconectar. Assim, o algoritmo RTT-I propõe que um CH recém-eleito receba um curto período fixo de imunidade (PERIODO\_IMUNIDADE), independente da densidade da rede. Durante esse tempo, ele ignora as regras de conflito com outros veículos CH. Com esta heurística, o *cluster* tem tempo suficiente para se estabelecer, convidar membros e se estabilizar antes de precisar resolver conflitos com *clusters* vizinhos, resultando em menos renúncias desnecessárias.

### 4.4. Algoritmo RTT com Heurísticas Combinadas (RTT-HI)

A proposta RTT-HI unifica a lógica base com as heurísticas de hesitação e imunidade. O Algoritmo 1 apresenta o funcionamento integrado dessas heurísticas ao fluxo de mensagens do RTT-B. O algoritmo adota uma dinâmica orientada a eventos, incorporando o temporizador de hesitação e o período de imunidade diretamente nos procedimentos de manipulação disparados pela recepção de mensagens de controle. Esta abordagem minimiza as eleições de CH e as renúncias desnecessárias em cenários veiculares densos.

## 5. Experimentos e Resultados

Para desenvolver o algoritmo baseado em RTT para a formação de *clusters* em VANETs, a linguagem de programação C++ foi empregada, aproveitando seu desempenho e flexibilidade. Além disso, o algoritmo baseado em RTT e suas versões aprimoradas por heurísticas foram avaliadas e comparadas com uma abordagem tradicional LID por meio de experimentação baseada em simulação.

Para criar um ambiente de experimentação para a avaliação dos algoritmos, um cenário foi projetado utilizando o simulador de rede Network Simulator 3 (NS-3). O NS-3 permitiu uma simulação detalhada, proporcionando um ambiente realista para o estudo [Riley and Henderson 2010]. Nesse viés, a camada física foi configurada seguindo o padrão Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11p (Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)). Diferentemente de modelos de alcance fixo, a recepção de mensagens é condicionada a limiares de detecção de energia e sensibilidade do receptor. Essa configuração garante que interferências entre emissores e perdas de pacotes sejam contabilizadas, permitindo que o cálculo do RTT incorpore atrasos reais de processamento e variações do canal de comunicação. Para aumentar o realismo, os seguintes recursos foram utilizados: o sistema Monitoring and Dissemination of Urban Events (MINUET), que é um *framework* de simulação para redes VANET [Andrade et al. 2020]; o sistema Simulation of Urban Mobility (SUMO), que é um simulador de tráfego [Alvarez Lopez et al. 2018]; e dados do projeto LuST, que fornece uma infraestrutura urbana e geometria viária realistas [Codeca et al. 2015]. Nesse contexto, a Figura 2 representa o traçado geral da cidade de Luxemburgo e a região selecionada, que foi delimitada pelas coordenadas  $X = 5708.96$ ,  $Y = 8640.74$ ,  $X_{min} = 3220.49$  e  $Y_{min} = 7396.17$ , representando os limites de longitude e latitude da área simulada.

Para criar a mobilidade veicular no cenário, utilizou-se a ferramenta *randomTrips.py* (incluída no SUMO). Este *script* gera fluxos de tráfego aleatórios com

---

### Algoritmo 1 RTT-HI: Agrupamento Unificado com Hesitação e Período de Imunidade

---

**Entrada:** Mensagem recebida *msg*, Estado do nó *meuEstado*

---

```

1: procedimento TRATARMENSAGEM(msg)
2:   rtt  $\leftarrow$  TempoAtual() – msg.instante
3:   se msg.tipo = DESCOBERTA então
4:     se meuEstado = CANDIDATO  $\wedge$  msg.estado = CH então
5:       CANCELARPROMOCAO
6:       meuEstado  $\leftarrow$  OCIOSO ▷ Hesitação (RTT-H)
7:     senão se meuEstado = CH  $\wedge$  msg.estado = CH então
8:       se msg.idRemetente < meuId então
9:         fimImunidade  $\leftarrow$  tempoEleito + PERIODO_IMUNIDADE
10:        se TempoAtual() > fimImunidade então
11:          meuEstado  $\leftarrow$  OCIOSO ▷ Período de Imunidade (RTT-I) expirou
12:        fim se
13:      fim se
14:      senão se meuEstado = OCIOSO então
15:        ENVIAR(RESPOSTA, msg.remetente) ▷ Base (RTT-B)
16:      fim se
17:      senão se msg.tipo = RESPOSTA então
18:        se rtt  $\leq$  RTT_THRESHOLD então
19:          se meuEstado = OCIOSO então
20:            meuEstado  $\leftarrow$  CANDIDATO ▷ Hesitação (RTT-H)
21:            espera  $\leftarrow$  Random(0, 0.1)
22:            AGENDARPROMOCAO(após espera)
23:          senão se meuEstado = CH então
24:            ENVIAR(CONVITE, msg.remetente) ▷ Base (RTT-B)
25:          fim se
26:        fim se
27:        senão se msg.tipo = CONVITE então
28:          se meuEstado = OCIOSO  $\vee$  meuEstado = CANDIDATO então
29:            se meuEstado = CANDIDATO então
30:              CANCELARPROMOCAO
31:            fim se
32:            meuEstado  $\leftarrow$  CM ▷ Entrar no cluster
33:          fim se
34:          senão se msg.tipo = CHECAGEM então
35:            se meuEstado = CH então
36:              ATUALIZARTABELAMEMBROS(msg.remetente, TempoAtual())
37:            fim se
38:          fim se
39: fim procedimento

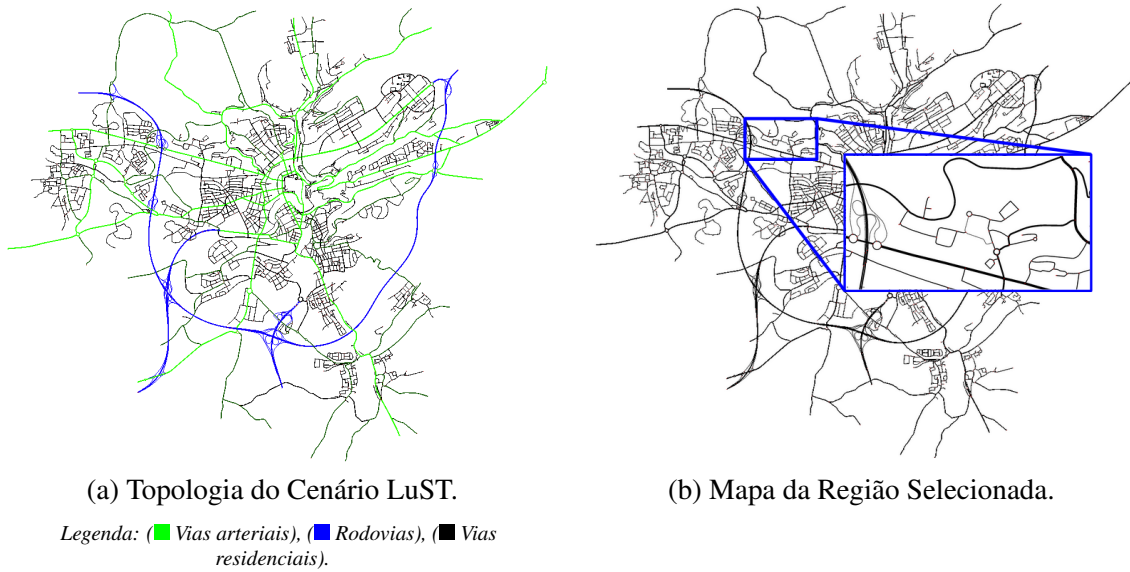
```

---

base em parâmetros de entrada. Para este trabalho, os parâmetros foram configurados para realizar uma simulação de 600 segundos, com a densidade veicular variando em quatro cenários distintos. Esses cenários são definidos pelo número total de veículos e seus respectivos períodos de geração, representando suas densidades: Baixa (150 veículos, 4.00 s/veículo); Média (300 veículos, 2.00 s/veículo); Alta (451 veículos, 1.33 s/veículo); e Saturada (599 veículos, 1.00 s/veículo). Em relação à configuração do algoritmo RTT, foram adotados os seguintes parâmetros principais: INTERVALO\_DESCOBERTA = 1.00 s, RTT\_THRESHOLD = 0.01 s, TEMPO\_EXPIRACAO\_VIZINHO = 3.00 s e PERIODO\_IMUNIDADE = 2.00 s.

A Tabela 1 apresenta os dados brutos obtidos nos experimentos, detalhando o desempenho de cada variação do algoritmo nos quatro cenários de densidade. A análise comparativa dos resultados é apresentada na Figura 3.

A Tabela 2 quantifica o impacto da abordagem tradicional LID e de cada heurística proposta, descrevendo a porcentagem de melhoria em relação ao algoritmo base (RTT-B). Os resultados demonstram que a abordagem LID é consistentemente superada por todas



**Figura 2. Cenário de Simulação.**

as variações baseadas em RTT, enquanto cada heurística melhora significativamente o algoritmo base em diversas métricas de estabilidade. A heurística RTT-H proporcionou o maior ganho em comparação com a versão base do algoritmo, enquanto a heurística RTT-I ofereceu um melhor *trade-off* em relação ao tamanho dos *clusters* formados. Além disso, a combinação de heurísticas provou ser uma abordagem superior, resultando em um melhor desempenho geral, especialmente em cenários de alta densidade veicular.

**Tabela 2. Melhoria Consolidada dos Algoritmos sobre o Algoritmo Base (RTT-B)**

| Métrica               | Densidade Veicular | LID     | RTT-H   | RTT-I  | RTT-HI  |
|-----------------------|--------------------|---------|---------|--------|---------|
| <b>Duração Méd.</b>   | Baixa              | -45.9%  | +18.0%  | +10.2% | +12.2%  |
|                       | Média              | -26.9%  | +79.4%  | +31.3% | +93.3%  |
|                       | Alta               | -6.3%   | +157.2% | +70.9% | +207.8% |
|                       | Saturada           | -6.8%   | +251.9% | +98.9% | +304.9% |
| <b>Eleições de CH</b> | Baixa              | +121.4% | -15.8%  | -6.0%  | -10.2%  |
|                       | Média              | +64.2%  | -47.7%  | -21.0% | -50.5%  |
|                       | Alta               | +32.1%  | -65.2%  | -37.7% | -67.9%  |
|                       | Saturada           | +30.1%  | -73.6%  | -42.0% | -76.0%  |
| <b>Overhead</b>       | Baixa              | +3.6%   | -0.1%   | -0.0%  | +0.2%   |
|                       | Média              | +1.4%   | -5.5%   | -0.5%  | -5.0%   |
|                       | Alta               | -2.2%   | -12.7%  | -2.8%  | -11.5%  |
|                       | Saturada           | -4.3%   | -21.4%  | -2.3%  | -19.2%  |
| <b>RTT Méd.</b>       | Baixa              | n/a     | -2.6%   | -2.6%  | -2.6%   |
|                       | Média              | n/a     | -10.0%  | -6.7%  | -10.0%  |
|                       | Alta               | n/a     | -18.1%  | -12.4% | -16.2%  |
|                       | Saturada           | n/a     | -23.4%  | -12.9% | -21.8%  |
| <b>Tamanho Méd.</b>   | Baixa              | -4.7%   | +3.7%   | -1.6%  | +1.6%   |
|                       | Média              | -7.2%   | +7.2%   | -6.8%  | +3.4%   |
|                       | Alta               | -10.4%  | +12.6%  | -10.4% | +4.9%   |
|                       | Saturada           | -12.6%  | +17.0%  | -18.4% | +6.7%   |

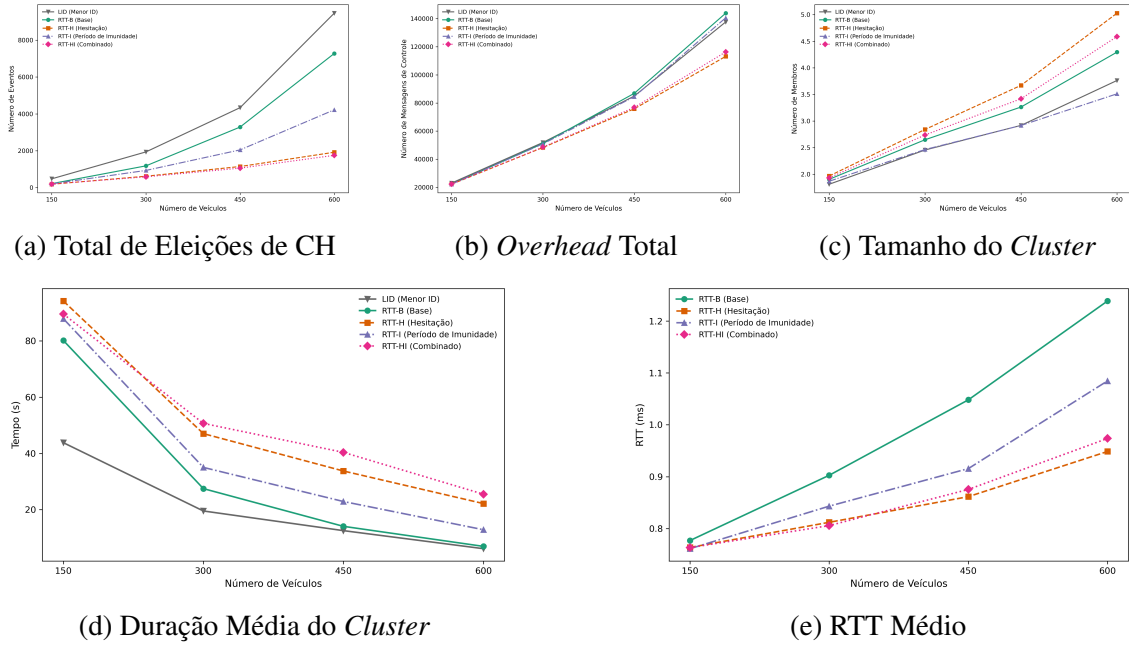
**Tabela 1. Métricas de Desempenho Consolidadas em todos os Cenários**

| Densidade | Algoritmo | Dur. (s) | Eleições | Overhead | Tamanho | RTT (ms) |
|-----------|-----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| Baixa     | LID       | 43.19    | 476      | 23007    | 1.81    | n/a      |
|           | RTT-B     | 79.81    | 215      | 22202    | 1.90    | 0.78     |
|           | RTT-H     | 94.21    | 181      | 22175    | 1.97    | 0.76     |
|           | RTT-I     | 87.92    | 202      | 22198    | 1.87    | 0.76     |
|           | RTT-HI    | 89.57    | 193      | 22249    | 1.93    | 0.76     |
| Média     | LID       | 19.17    | 1936     | 51878    | 2.46    | n/a      |
|           | RTT-B     | 26.22    | 1179     | 51150    | 2.65    | 0.90     |
|           | RTT-H     | 47.04    | 617      | 48313    | 2.84    | 0.81     |
|           | RTT-I     | 34.42    | 931      | 50882    | 2.47    | 0.84     |
|           | RTT-HI    | 50.68    | 584      | 48588    | 2.74    | 0.81     |
| Alta      | LID       | 12.30    | 4338     | 84938    | 2.92    | n/a      |
|           | RTT-B     | 13.12    | 3285     | 86861    | 3.26    | 1.05     |
|           | RTT-H     | 33.75    | 1143     | 75838    | 3.67    | 0.86     |
|           | RTT-I     | 22.42    | 2046     | 84479    | 2.92    | 0.92     |
|           | RTT-HI    | 40.38    | 1055     | 76868    | 3.42    | 0.88     |
| Saturada  | LID       | 5.87     | 9465     | 137651   | 3.76    | n/a      |
|           | RTT-B     | 6.30     | 7278     | 143893   | 4.30    | 1.24     |
|           | RTT-H     | 22.17    | 1918     | 113166   | 5.03    | 0.95     |
|           | RTT-I     | 12.53    | 4221     | 140590   | 3.51    | 1.08     |
|           | RTT-HI    | 25.51    | 1750     | 116302   | 4.59    | 0.97     |

## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este artigo propôs um algoritmo de agrupamento veicular baseado em RTT, projetado para enfrentar o complexo desafio de formar *clusters* veiculares estáveis e de baixa latência para a disseminação de informações em VANETs. Diferenciando-se das abordagens tradicionais que frequentemente dependem de métricas de mobilidade (velocidade, direção, posição do veículo, etc.), este trabalho estabelece um algoritmo de agrupamento centrado na camada de rede, avaliando diretamente a qualidade e a velocidade da comunicação na rede. Para validar este conceito, uma proposta base inicial de RTT foi criada, seguida por duas heurísticas distintas (Hesitação e Período de Imunidade) projetadas para aprimorar seu desempenho.

Por meio dos resultados demonstrados, validados mediante extensas simulações, a proposta de agrupamento baseada em RTT mostrou-se altamente capaz de formar *clusters* estáveis, caracterizados por uma maior duração média, e de baixa latência, fornecendo uma alternativa de agrupamento veicular altamente eficaz para a disseminação de informações pela rede. A análise comparativa revelou que até mesmo a versão mais simples, RTT-B, proporcionou estabilidade superior no tempo de vida dos agrupamentos em comparação com a abordagem tradicional LID, justificando a mudança para métricas da camada de rede. Uma descoberta fundamental da análise comparativa executada foi que, embora a abordagem base de RTT e as heurísticas fossem capazes de formar *clusters*, suas diferenças intrínsecas levaram a variações na análise de desempenho do agrupamento. A versão base demonstrou ser um ponto de partida simples para o algoritmo, que acabou falhando sob estresse, justificando a necessidade das heurísticas. A heurística de Hesitação abordou diretamente o problema de nós tentando se tornar CHs simultaneamente, aumen-



**Figura 3. Análise Comparativa dos algoritmos.**

*Nota: O LID é omitido da análise de RTT pois não emprega métricas de latência da camada de rede.*

tando significativamente a duração do *cluster* enquanto reduzia as reeleições de CH e o *overhead* de rede. Em contraste, a heurística de Período de Imunidade atua como um escudo para novos CHs, dando-lhes tempo para se estabelecerem e manterem sua liderança, melhorando a estabilidade da topologia, mas ao custo de um *trade-off* perceptível para o algoritmo: a redução no tamanho médio de veículos no *cluster*. Finalmente, a combinação de ambas as heurísticas resultou em um algoritmo estável e eficiente, garantindo agrupamentos mais duradouros, especialmente em cenários de alta densidade, proporcionando um ambiente adequado para a comunicação veicular em VANETs.

Como continuação deste trabalho, diversas possibilidades podem ser exploradas. Primeiramente, comparações de desempenho em larga escala podem ser conduzidas utilizando os algoritmos baseados em RTT em relação a outros métodos de agrupamento consolidados em redes veiculares. Além disso, também é possível variar os parâmetros do algoritmo de agrupamento baseado em RTT para analisar as mudanças resultantes no desempenho. Por fim, a implementação da capacidade de comunicação Veículo-para-Infraestrutura (V2I) no algoritmo é uma possibilidade interessante, permitindo a comunicação dos dados coletados pelos *clusters* para as RSUs.

## Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil (PROAP/AUXPE). Os autores também agradecem à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) pela bolsa PROBIC.

## Referências

Alvarez Lopez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., and Wießner, E. (2018). Microscopic traffic

- simulation using SUMO. In *2018 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pages 2575–2582. IEEE.
- Andrade, E., Veloso, K., Vasconcelos, N., Santos, A., and Matos, F. (2020). Cooperative monitoring and dissemination of urban events supported by dynamic clustering of vehicles. *Pervasive and Mobile Computing*, 67:101244.
- Codeca, L., Frank, R., and Engel, T. (2015). Luxembourg SUMO traffic (LuST) scenario: 24 hours of mobility for vehicular networking research. In *2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pages 1–8. IEEE.
- Cooper, C., Franklin, D., Ros, M., Safaei, F., and Abolhasan, M. (2017). A comparative survey of VANET clustering techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1):657–681.
- Cunha, F., Villas, L., Boukerche, A., Maia, G., Viana, A., Mini, R. A., and Loureiro, A. A. (2016). Data communication in VANETs: Protocols, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*, 44:90–103.
- Damjanović, M., Stević, Željko., Stanimirović, D., Tanackov, I., and Marinkovic, D. (2022). Impact of the number of vehicles on traffic safety: Multiphase modeling. *Facta Universitatis Series Mechanical Engineering*, 20(1):177–197.
- Datta, S. K., Haerri, J., Bonnet, C., and Ferreira Da Costa, R. (2017). Vehicles as connected resources: Opportunities and challenges for the future. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(2):26–35.
- Kumar, M. and Raw, R. S. (2025). MC2R : Multi criteria based cluster routing for software defined VANET. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 46(1):187–203.
- Mirkovic, D., Armitage, G., and Branch, P. (2018). A survey of round trip time prediction systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3):1758–1776.
- Nawej, C. M., Owolawi, P. A., and Walingo, T. M. (2025). Advanced clustering for mobile network optimization: A systematic literature review. *Sensors*, 25(23).
- Pidy Pidy, L. T., Moskolai Ngossaha, J., Karunathilake, T., Bowong Tsakou, S., and Förster, A. (2025). An efficient cluster-based routing protocol for enhanced data delivery and stability in VANETs: Cluster-based ant-colony routing with adaptive cluster head. *IET Networks*, 14(1):e70013.
- Riley, G. F. and Henderson, T. R. (2010). The ns-3 network simulator. In Wehrle, K., Güneş, M., and Gross, J., editors, *Modeling and Tools for Network Simulation*, pages 15–34. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Toh, C. (2001). *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*. Pearson Education.
- Tomar, P., Chaurasia, B. K., and Tomar, G. (2010). State of the art of data dissemination in VANETs. *International journal of computer theory and engineering*, 2(6):957–962.
- Yury, A., Andrade, E., Nogueira, M., Santos, A., and Matos, F. (2020). Social-based cooperation of vehicles for data dissemination of critical urban events. In *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6.