

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RODRIGO SILVA

**PROPOSTA DE BENCHMARK PARA SIMULAÇÕES DE
ROTEAMENTO DE DADOS EM REDES VEICULARES AD HOC**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2015

RODRIGO SILVA

**PROPOSTA DE BENCHMARK PARA SIMULAÇÕES DE
ROTEAMENTO DE DADOS EM REDES VEICULARES AD HOC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Telemática.

Orientador: Heitor Silvério Lopes

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S586p
2015

Silva, Rodrigo, 1981-
Proposta de benchmark para simulações de roteamento de dados em redes veiculares ad hoc / Rodrigo Silva.-- 2015.
113 f. : il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2015
Bibliografia: p. 82-84

1. Redes veiculares ad hoc (Redes de computadores). 2. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 3. Trânsito - Fluxo - Simulação por computador. 4. Trânsito - Fluxo - Curitiba (PR). 5. Algoritmos da formiga. 6. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Lopes, Heitor Silvério, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação N°. _____

Proposta de Benchmark para Simulações de Roteamento de Dados em Redes Veiculares ad hoc

por

Rodrigo Silva

Orientador: Prof. Dr. Heitor Silvério Lopes

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Telecomunicações e Redes** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **9:00h** do dia **29 de setembro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Rafael Stubs Parpinelli
(UDESC)

Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Tenho plena convicção de que não fiz este trabalho sozinho, mas ele é fruto da cooperação de várias pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a sua concretização.

Primeiramente sou grato a Deus. Sou grato pelo ar que respiro, pela vida, pela família com a qual me presenteou e por Sua bondade e misericórdia que me permitiram alcançar mais este objetivo.

Agradeço à minha família que mesmo estando fisicamente distantes estiveram tão próximos nesta minha caminhada e não pouparam esforços em me ajudar. Destaque para cinco dessas pessoas: Marta, Celson, Elisama, Maria Eduarda e Maria Joana.

Agradeço especialmente à minha esposa Mary Ane, que foi e continua sendo o meu porto seguro, uma companheira com quem posso contar não somente nos momentos de felicidade, mas é alguém com quem posso compartilhar minhas dificuldades, meus medos e anseios. Mary, obrigado pela compreensão e pelas palavras de incentivo.

Compartilho o resultado deste trabalho com duas pessoas que foram imprescindíveis na sua realização, meus amigos, professores e orientadores Walter Godoy Jr. (*in Memoriam*) e Heitor Silvério Lopes. Obrigado por acreditarem em mim e por contribuírem no processo de “lapidação de um pesquisador”, que iniciou neste Mestrado.

Quero agradecer também à “École des Mines de Paris”, mais precisamente ao “Centre de Robotique”(CAOR), na pessoa do seu diretor Arnaud de la Fortelle e ao “Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique”(INRIA Paris), na pessoa do professor e pesquisador Thierry Ernst, por abrirem as portas de suas instituições e me acolherem durante meu intercâmbio de 6 meses. Obrigado por me propiciarem a oportunidade de participar no desenvolvimento de um protótipo de estações ITS comunicantes.

Agradeço as pessoas do laboratório de Bio Informática da Universidade Tecnológica Federal do Parana. Destaque para os pesquisadores Hugo Perlin, Manassés Ribeiro e Leandro Takeshi Hattori, que me deram o suporte necessário para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos demais amigos que direta ou indiretamente me apoiaram neste trabalho e compreenderam a minha escassez de tempo.

RESUMO

SILVA, Rodrigo. PROPOSTA DE BENCHMARK PARA SIMULAÇÕES DE ROTEAMENTO DE DADOS EM REDES VEICULARES AD HOC. 113 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Nas últimas décadas, fatores como maior facilidade de crédito e aumento da renda média dos brasileiros motivaram o crescimento das vendas de veículos novos. Com isso, a quantidade de veículos em circulação também aumentou significativamente. Como consequência desse crescimento observa-se o aumento de congestionamento nas grandes cidades, maior número de acidentes de trânsito com vítimas fatais, dentre outros problemas.

Neste contexto surge o Sistema de Transporte Inteligente (ITS), que oferece serviços e produtos que utilizam a comunicação de dados no intuito de melhorar o sistema de transporte. Neste sistema, os veículos, os equipamentos móveis e a infraestrutura nas proximidades das vias de tráfego podem transferir dados entre si, formando assim uma rede de comunicação de dados denominada VANET. Esta comunicação permite a implantação de uma série de serviços e soluções de segurança, informação e entretenimento no trânsito.

Para gerenciar o roteamento de dados nestas redes de topologia altamente dinâmica, uma série de algoritmos baseados em ACO (*Ant Colony Optimization*) vem sendo criados. Estes algoritmos são baseados no comportamento das formigas ao saírem de seus ninhos em busca de alimento, as quais tendem a escolher o caminho mais curto entre ninho e alimento.

No entanto, observa-se que na literatura não há um padrão para comparação de desempenho destes algoritmos heurísticos, sendo comumente comparados entre si ou com algoritmos de redes MANETs. Neste trabalho foi criado um *benchmark* com várias instâncias de roteamento em redes VANETs que podem ser utilizadas para teste de outros algoritmos.

Os simuladores de mobilidade e de rede foram configurados para que os cenários de simulação se aproximassem de redes VANETs reais. A área de simulação escolhida para cada cenário foi uma região localizada próxima ao centro da cidade de Curitiba/PR, na qual várias densidades de veículos foram distribuídas de duas formas distintas, uma aleatória e outra tendenciosa a obter maior fluxo nas grandes avenidas. Foram também aplicados o modelo de propagação *three log distance* sozinho e combinado com o modelo de desvanecimento de Nakagami.

Em cada cenário, os veículos origem e destino foram mantidos fixos em lados opostos da área de simulação. Para cada instante da simulação foi aplicado o algoritmo Dijkstra para obter o menor caminho entre origem e destino para a transmissão de pacotes de dados. Um algoritmo de roteamento multiobjetivo baseado em ACO foi proposto e seus resultados foram comparados com o *benchmark*. Os caminhos encontrados pelo ACO apresentaram maiores números de saltos e, conseqüentemente, custos superiores aos encontrados pelo algoritmo de Dijkstra.

Um *benchmark* com vários cenários foi criado. As simulações destes cenários mostraram a influência de diversos fatores na conectividade de uma rede VANET, como a densidade de veículos, suas localizações geográficas e modelo de propagação usado.

Os resultados obtidos são promissores e apontam a importância na escolha dos modelos de simulação. Tais resultados incentivam o uso de algoritmos heurísticos para roteamento de dados em redes VANET.

Palavras-chave: ACO, ITS, VANET, WAVE, VanetMobiSim, NS-3

ABSTRACT

SILVA, Rodrigo. PROPOSAL OF A BENCHMARK FOR ROUTING SIMULATIONS IN VEHICULAR AD HOC NETWORKS. 113 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

In the last decades, we have witnessed an increasing sale of new cars, driven by extensive credit availability and the growth of average income. Hence, the number of vehicles on the roads has increased. Due to this high density of vehicles, the traffic jams as well as fatal accidents are increasing.

In order to reduce such factors, the Intelligent Transportation Systems (ITS) aroused, offering connected services and products related to entertainment and road safety. In this system, vehicles, mobile equipments and the infrastructure in the neighborhood of the traffic ways can transfer data to each other, thus creating a network called VANET (Vehicular Ad-hoc Network).

To optimize the packets routing in these dynamic networks, several Ant Colony Optimization (ACO) - based algorithms have been proposed. Such algorithms are inspired by the foraging behavior of ants, which are capable of finding the shortest paths from food sources to the nest.

However, there are no performance evaluation standards in the recent literature. The algorithms are often compared to each other or with MANET's algorithms. In this dissertation, a benchmark of several routing instances for VANETs was created. These benchmarks can be used for testing routing algorithms.

The mobility and network simulators were configured in order to create real-world VANET-like scenarios. The geographical area chosen for the scenarios was near to Curitiba downtown. Different vehicle densities were distributed in two way: purely random and biased in such a way that avenues receive higher vehicle flows. The three log-distance path loss model was applied to each scenario, sometimes combined with the Nakagami fading model.

In each scenario the source and destination vehicles are fixed on opposite sides of the simulated area. For each simulation time step, the Dijkstra algorithm was run to find the shortest path data transmission between source and destination. A multiobjective ACO-based algorithm was proposed and compared with the Dijkstra algorithm. The paths found by ACO include higher number of hops than those found by the Dijkstra algorithm.

A benchmark with several scenarios was created. The scenario's simulations show the importance of several factors in the VANET connectivity, such as vehicle density, geographical location and propagation models. The results are promising and indicate the importance of choosing appropriated simulation models.

Keywords: ACO, ITS, VANET, WAVE, VanetMobiSim, NS-3

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| FIGURA 1 | – Pontos negativos do aumento do número de veículos. | 15 |
| FIGURA 2 | – Arquitetura de uma ITS-S (adaptado de (ISO 21217, 2014)). | 20 |
| FIGURA 3 | – Modelo para análise do movimento de formigas entre Ninho (A) e Alimento (C). | 27 |
| FIGURA 4 | – Exemplo de caminho em um Grafo. | 27 |
| FIGURA 5 | – Exemplo de curva de Pareto (problema de minimização). | 30 |
| FIGURA 6 | – Exemplo do Método NISE. | 32 |
| FIGURA 7 | – Exemplo do método ε -Restrição. | 32 |
| FIGURA 8 | – Diagrama dos campos considerados pelo modelo de propagação <i>Three Log Distance</i> | 35 |
| FIGURA 9 | – Modelo de Propagação de Dois Raios - fonte (SOMMER et al., 2012). . | 36 |
| FIGURA 10 | – Principais variáveis utilizadas pelos protocolos baseados em ACO. | 43 |
| FIGURA 11 | – Protocolos mais utilizados na literatura para comparação com algoritmos ACO. | 43 |
| FIGURA 12 | – Diagrama em Bloco do Projeto. | 44 |
| FIGURA 13 | – Distância Euclidiana entre solução e origem do espaço objetivo. | 47 |
| FIGURA 14 | – Exemplo de arquivo de rastreamento do VanetMobiSim. | 49 |
| FIGURA 15 | – Exemplo de arquivo de rastreamento do NS-3. | 51 |
| FIGURA 16 | – Área de Simulação 600 m x 600 m próximo ao centro da cidade de Curitiba/PR. | 59 |
| FIGURA 17 | – Custo dos caminhos encontrados pelas formigas na execução do ACO em um instante da rede - cenário 1 e rede com 200 veículos. | 65 |
| FIGURA 18 | – Topologia da Rede com 50 veículos. | 69 |
| FIGURA 19 | – Topologia da Rede com 200 veículos. | 69 |
| FIGURA 20 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 1 e rede com 200 veículos. | 71 |
| FIGURA 21 | – Espaço objetivo do cenário 1 e rede com 200 veículos - Instante $T = 104s$ | 71 |
| FIGURA 22 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 1 e rede com 200 veículos (100 formigas). | 72 |
| FIGURA 23 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 1 e rede com 400 veículos. | 73 |
| FIGURA 24 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 2 e rede com 200 veículos. | 74 |
| FIGURA 25 | – Espaço objetivo do cenário 2 e rede com 200 veículos - Instante $T = 38s$ | 74 |
| FIGURA 26 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 3 e rede com 400 veículos. | 75 |
| FIGURA 27 | – Espaço objetivo do cenário 3 e rede com 400 veículos - Instante $T = 78s$ | 76 |
| FIGURA 28 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 4 e rede com 400 veículos. | 77 |
| FIGURA 29 | – Espaço objetivo do cenário 4 e rede com 400 veículos - Instante $T = 70s$ | 77 |
| FIGURA 30 | – Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - | |

cenário 5 e rede com 200 veículos. 78

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|-----|
| TABELA 1 | – Síntese dos valores de cada parâmetro de configuração dos cenários. ... | 56 |
| TABELA 2 | – Parâmetros de configuração usados no ACO. | 64 |
| TABELA 3 | – Resumo das simulações realizadas. | 64 |
| TABELA 4 | – Parâmetros dos modelos usados nas simulações. | 64 |
| TABELA 5 | – Resumo dos resultados das simulações | 66 |
| TABELA 6 | – Resultados cenário 1 - 200 veículos | 85 |
| TABELA 7 | – Resultados cenário 1 - 400 veículos | 87 |
| TABELA 8 | – Resultados cenário 2 - 200 veículos | 91 |
| TABELA 9 | – Resultados cenário 2 - 400 veículos | 94 |
| TABELA 10 | – Resultados cenário 3 - 400 veículos | 98 |
| TABELA 11 | – Resultados cenário 4 - 200 veículos | 101 |
| TABELA 12 | – Resultados cenário 4 - 400 veículos | 102 |
| TABELA 13 | – Resultados cenário 5 - 200 veículos | 105 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------------|---|
| ABC | <i>Artificial Bee Colony</i> |
| ACO | <i>Ant Colony Optimization</i> |
| AG | <i>Algoritmos Genético</i> |
| AODV | <i>Ad hoc On-Demand Distance Vector</i> |
| AOMDV | <i>Ad-hoc On Demand Multipath Distance Vector</i> |
| AP | <i>Access Point</i> |
| AS | <i>Ant System</i> |
| AWGN | <i>Additive White Gaussian Noise</i> |
| CanuMobiSim | <i>Communication in Ad hoc Networks for Ubiquitous Computing</i> |
| CSMA | <i>Carrier Sense Multiple Access</i> |
| DENATRAN | <i>Departamento Nacional de Trânsito</i> |
| GlomoSim | <i>Global Mobile Information System Simulator</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| GPSR | <i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i> |
| HMI | <i>Human-Machine Interface</i> |
| IDM-IM | <i>Intelligent Driver Model with Intersection Management</i> |
| IDM-LC | <i>Intelligent Driver Model with Lane Changes</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| ITS | <i>Intelligent Transportation System</i> |
| ITS-S | <i>ITS Station</i> |
| LAN | <i>Local Area Network</i> |
| MAN | <i>Metropolitan Area Network</i> |
| MANET | <i>Mobile Ad hoc NETWORK</i> |
| MOVE | <i>MObility model generator for VEhicular networks</i> |
| NCTUns | <i>National Chiao Tung University Network Simulator</i> |
| NISE | <i>NonInferior Set Estimation</i> |
| NS | <i>Network Simulator</i> |
| OICA | <i>Organização Internacional dos Construtores de Automóveis</i> |
| OLSR | <i>Optimized Link State Routing Protocol</i> |
| OSI | <i>Open Systems Interconnect</i> |
| OSM | <i>Open Street Maps</i> |
| PG | <i>Programação Genética</i> |
| PSO | <i>Particle Swarm Optimization</i> |
| QualNet | <i>Quality Networking</i> |
| SAP | <i>Serviço de Ponto de Acesso</i> |
| TIGER | <i>Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing</i> |
| TraNS | <i>Traffic and Network Simulator environment</i> |
| TSP | <i>Traveling Salesman Problem</i> |
| UTFPR | <i>Universidade Tecnológica Federal do Paraná</i> |
| V2I | <i>Vehicle-to-Infrastructure</i> |
| V2V | <i>Vehicle-to-Vehicle</i> |

| | |
|--------------|---|
| VANET | <i>Vehicular Ad hoc Network</i> |
| VanetMobiSim | <i>Vehicular ad hoc networks Mobility Simulator</i> |
| WAN | <i>Wide Area Network</i> |
| WAVE | <i>Wireless Access for Vehicular Environments</i> |
| WiFi | <i>Wireless Fidelity</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS | 17 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 17 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 2.1 SISTEMA DE TRANSPORTE INTELIGENTE - ITS | 19 |
| 2.2 REDES DE COMUNICAÇÃO | 21 |
| 2.2.1 Redes VANET | 21 |
| 2.3 ALGORITMOS DE ROTEAMENTO | 23 |
| 2.3.1 Computação Evolucionária | 24 |
| 2.3.1.1 ACO - <i>Ant Colony Optimization</i> | 25 |
| 2.4 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO | 28 |
| 2.4.1 Soluções ótimas de Pareto | 29 |
| 2.4.2 Métodos para Otimização Multiobjetivo | 30 |
| 2.4.2.1 Método dos Pesos | 30 |
| 2.4.2.2 Método NISE | 31 |
| 2.4.2.3 Método da ϵ -Restrição | 31 |
| 2.5 SIMULADORES DE REDE E MOBILIDADE | 32 |
| 2.5.1 Simuladores de Rede (NS-3) | 33 |
| 2.5.1.1 Flow Monitor | 36 |
| 2.5.2 Simulador de Mobilidade e Tráfego (VanetMobiSim) | 38 |
| 2.6 TRABALHOS CORRELATOS | 38 |
| 2.6.1 MAV-AODV | 39 |
| 2.6.2 MAZACORNET | 40 |
| 2.6.3 AntRS | 41 |
| 2.6.4 MAR-DYMO | 42 |
| 2.7 PRINCIPAIS VARIÁVEIS USADAS EM ACO | 42 |
| 3 METODOLOGIA | 44 |
| 3.1 VISÃO GERAL DO PROJETO | 44 |
| 3.2 FUNÇÃO OBJETIVO | 45 |
| 3.2.1 Modelagem Matemática | 46 |
| 3.3 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO | 48 |
| 3.3.1 Simulação de Mobilidade | 48 |
| 3.3.2 Simulação de Rede | 49 |
| 3.3.3 Análise Determinística | 51 |
| 3.3.4 Análise Heurística | 52 |
| 3.3.5 Ambiente de Simulação | 55 |
| 3.4 APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS A SEREM SIMULADOS | 55 |
| 3.4.1 Cenário de referência | 55 |
| 3.4.2 Cenário 1 | 58 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.3 Cenário 2 | 61 |
| 3.4.4 Cenário 3 | 61 |
| 3.4.5 Cenário 4 | 61 |
| 3.4.6 Cenário 5 | 62 |
| 4 RESULTADOS E ANÁLISES | 63 |
| 5 CONCLUSÕES | 79 |
| 5.1 TRABALHOS FUTUROS | 80 |
| REFERÊNCIAS | 82 |
| Anexo A – RESULTADOS CENÁRIO 1 | 85 |
| Anexo B – RESULTADOS CENÁRIO 2 | 90 |
| Anexo C – RESULTADOS CENÁRIO 3 | 97 |
| Anexo D – RESULTADOS CENÁRIO 4 | 101 |

1 INTRODUÇÃO

Tem-se observado um grande crescimento do número de veículos nos últimos anos. Segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) e OThink (ASSIS,), o Brasil apresentou um crescimento em sua frota de veículos de 137% em 11 anos, passando de 29 milhões de veículos no ano de 2000 a 69 milhões no ano de 2011. Em 2014 a frota nacional anunciada pelo DENATRAN foi superior a 86 milhões de veículos.

Diversos fatores contribuíram para este crescimento no Brasil, tais como a implantação de novas montadoras de veículos, aumento da disponibilidade de crédito e o aumento da renda média dos brasileiros.

No mundo não tem sido diferente, segundo a Organização Internacional dos Construtores de Automóveis (OICA) (OICA,), em 2014 foram produzidos mais de 89 milhões de veículos em todo o mundo.

Este crescimento aquece a economia, gerando empregos diretos e indiretos, gerando oportunidades de criação de novos produtos e novos serviços, e é possível de se imaginar que este aumento do número de veículos traga consigo pontos negativos também, conforme mostrado na Figura 1. Tem-se observado o aumento dos congestionamentos nas grandes cidades, o aumento do número de acidentes de trânsito, aumento de vítimas fatais no trânsito, aumento da poluição resultante da queima dos combustíveis, dentre outros. O sistema de transporte inteligente (*Intelligent Transportation System* (ITS)) surge neste cenário como uma forma inovadora para auxiliar o planejamento urbanístico, fornecendo produtos e serviços inovadores para diferentes modos de transporte e gerenciamento de tráfego, permitindo ao usuário fazer um uso melhor do sistema de transporte (ISO 21217, 2014).

O ITS descreve produtos e serviços que usam comunicação de dados e informações no intuito de melhorar o sistema de transporte. Para viabilizar esta comunicação de dados, o sistema formado pelos veículos e a infraestrutura nas proximidades por onde trafegam (estradas, estabelecimentos comerciais, semáforos, etc) são considerados como uma rede de dados do tipo ad hoc, ou seja, sem infraestrutura (denominada *Vehicular Ad hoc Network* (VANET)), em que



Figura 1: Pontos negativos do aumento do número de veículos.

todos os nós vizinhos podem se comunicar entre si. Dois nós são vizinhos se são alcançados pelos sinais de antena um do outro com potência suficiente para haver comunicação de dados.

Uma VANET é uma rede ad hoc em que os nós são formados por veículos ou elementos da infraestrutura das vias. É uma rede não hierárquica, ou seja, que não necessita de pontos de acesso para interligar os diversos nós. Os nós em uma VANET podem funcionar tanto como emissor/receptor de mensagens, quanto roteador de mensagens. Os nós terão a função de roteadores quando fizerem parte do caminho entre um nó fonte e um destino (SILVA et al., 2013).

Nos últimos anos uma grande variedade de empresas têm trabalhado no desenvolvimento de soluções para ITS. Isto tem resultado em uma série de produtos diferentes, mas que necessitam comunicar entre si. Para garantir a interoperabilidade entre estes sistemas desenvolvidos por estas diferentes empresas, algumas organizações estão desenvolvendo padrões para sistemas ITS. Uma arquitetura comum para estações ITS (*ITS Station (ITS-S)*) foi desenvolvida pela *International Organization for Standardization (ISO)* no documento ISO 21217 (2014). Além deste, uma série de outros padrões ITS estão em desenvolvimento, tais como o padrão ISO 17423 (2013) que estabelece os requisitos para a seleção da interface de comunicação e o padrão ISO 17419 (2013), que especifica o modo de gerenciamento das aplicações ITS.

1.1 MOTIVAÇÃO

Como já mencionado anteriormente, o número de veículos vem crescendo de forma acelerada nas últimas décadas. A grande concentração destes veículos, principalmente nas grandes cidades, exige ações para um melhor planejamento urbanístico solucionando problemas tais como congestionamentos e informação/prevenção de acidentes. A transmissão de dados entre veículos surge como uma dessas ações.

A possibilidade de comunicação de dados entre veículos permite a implantação de uma série de serviços como, por exemplo, difundir alerta de congestionamento a todos os veículos que trafegam em uma determinada região para que os mesmos evitem determinadas vias. Em caso de necessidade de frenagem brusca, um determinado veículo pode difundir uma mensagem de alerta aos veículos que se aproximam, fazendo com que tais veículos reduzam a velocidade e evitem colisões. Em um cruzamento com baixa visibilidade, os veículos podem ser alertados sobre a presença de outros veículos em direção contrária. A comunicação de dados pode propiciar também serviços de entretenimento e informação, possibilitando acesso à internet, serviço de *vídeo streaming*, ou ainda, veículos podem ser informados sobre promoções ao passarem nas proximidades de um estabelecimento comercial (MICHOUUD et al., 2012).

O serviço de comunicação de dados entre veículos é um assunto que vem sendo bastante estudado (SILVA et al., 2014) (MARTINS et al., 2010), mas para esta comunicação de dados ocorrer é necessária a existência de algoritmos de roteamento. Para problemas do mundo real normalmente estes algoritmos devem ser multiobjetivos, ou seja, devem considerar mais de um objetivo para o roteamento dos dados, tais como caminho menos congestionados e conexões com maior capacidade de transmissão de pacotes. Os algoritmos já desenvolvidos para redes *Mobile Ad hoc Network* (MANET) não atendem às necessidades das redes VANET pois estas possuem características específicas, como alta taxa de mobilidade e o fato dos nós (veículos) se movimentarem com velocidade elevada.

Há uma grande diversidade de algoritmos de roteamento bio-inspirados sendo desenvolvidos para roteamento em redes VANET (COUTINHO, 2015). Dentre estes pode-se destacar os algoritmos baseados no *Ant Colony Optimization* (ACO) (CARO et al., 2005) (SILVA et al., 2013) (RANA et al., 2013).

O ACO é um algoritmo inspirado no comportamento das formigas ao saírem de seus ninhos em busca de alimento. Estudos mostram que, ao encontrarem a fonte de alimento, estas formigas tendem, após algum tempo, a trafegar pelo caminho mais curto entre ninho e alimento.

Este comportamento pode ser explorado em problemas de otimização que possam ser

representados por um grafo e no qual deseja-se minimizar o custo do caminho entre dois pontos distintos deste grafo.

Um exemplo de problema com aplicação direta do ACO é o clássico problema do caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem* (TSP)) (DORIGO; STUTZLE, 2004). Neste problema tem-se um número fixo de N cidades e o objetivo é encontrar o menor caminho para visitar todas as cidades uma única vez, retornando à cidade de origem.

O desempenho dos algoritmos de roteamento baseados em ACO desenvolvidos até hoje para roteamento de dados em redes VANET têm sido comparados de duas maneiras:

- Com algoritmos de redes MANET. No entanto, como uma VANET possui características específicas em relação às redes MANET, tal comparação não representa uma boa indicação de desempenho;
- Entre si, ou seja, com outros algoritmos heurísticos desenvolvidos para roteamento em rede VANET (Ant-DYMO, AntHocNet, dentre outros). Porém, os algoritmos comparados não necessariamente possuem as mesmas variáveis e, portanto, a comparação também não retrata uma boa indicação de desempenho.

Observa-se que não há um padrão para comparação dos algoritmos. Isto se deve ao fato de não haver na literatura um conjunto de instancias de referência (*benchmark*) para a comparação destas categorias de algoritmos neste contexto de aplicação. No intuito de preencher esta lacuna, o presente trabalho propõem um *benchmark* para algoritmo de roteamento em redes VANET.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta dissertação é criar um *benchmark* com várias instâncias de roteamento em redes VANET que podem ser utilizadas para teste de outros algoritmos. Em seguida propor um algoritmo de roteamento multiobjetivo para rede VANET baseado no algoritmo de otimização por colônia de formigas e compará-lo ao *benchmark* criado.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Fazer um levantamento dos algoritmos ACO existentes para roteamento em VANET;
- Elencar e definir o conjunto de variáveis que influenciam uma rede veicular tipo VANET, baseado nos algoritmos ACO existentes na literatura;
- Criar um *benchmark* para propiciar a avaliação e comparação de algoritmos para roteamento em VANET. Este *benchmark* foi implementado usando o algoritmo Dijkstra (DIJKSTRA, 1959);
- Implementar um algoritmo multiobjetivo baseado em ACO para roteamento em rede VANET;
- Utilizar o *benchmark* criado para avaliar o desempenho do algoritmo ACO proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho trata mais especificamente sobre protocolos baseados em ACO para roteamento de dados em VANET, assunto que é parte integrante de sistemas de transporte inteligente. No entanto, antes de abordar diretamente o tema de roteamento de dados, faz-se necessário contextualizar o problema. Com este objetivo serão apresentados alguns temas a seguir.

Na Seção 2.1 será descrito o Sistema de Transporte Inteligente, apresentando sua definição, arquitetura e padrões internacionais que o definem. Na Seção 2.2 serão elencados os principais tipos de redes de comunicação, assim como será discorrido com mais detalhes sobre redes VANET. Na Seção 2.3 serão apresentados alguns algoritmos de roteamento e sua classificação. Nesta seção serão apresentados também algoritmos bio-inspirados e o tema de otimização baseado no ACO. Na Seção 2.4 será apresentado o tema de otimização multiobjetivo, assim como alguns dos métodos empregados neste processo. Na Seção 2.5 serão apresentados os principais simuladores de rede e de tráfego, dando ênfase aos simuladores que serão usados no presente trabalho. Finalizando este capítulo, a Seção 2.6 elenca os principais trabalhos encontrados na literatura, que aplicaram algoritmos baseado em ACO para roteamento em redes VANET.

2.1 SISTEMA DE TRANSPORTE INTELIGENTE - ITS

O sistema ITS engloba uma série de produtos e serviços inovadores que usam comunicação e informações no intuito de melhorar os diversos sistemas de transporte. Um dos atributos essenciais no sistema ITS é o compartilhamento de informações entre os diversos dispositivos que compõem sua rede. Esse compartilhamento requer comunicação entre diferentes dispositivos, como mostrado na Figura 2. Por exemplo, comunicação entre veículos (*Vehicle-to-Vehicle* (V2V)), entre veículos e dispositivos da infraestrutura nas proximidades das vias de tráfego (*Vehicle-to-Infrastructure* (V2I)), entre equipamentos móveis (celulares e tablets) e veículos e entre satélites e a infraestrutura da rede (SILVA et al., 2013) . Utiliza-se uma diversidade de

tecnologias de acesso, tais como 802.11p, infra-vermelho, 2G, 3G e satélites, como mostrado na Figura 2.

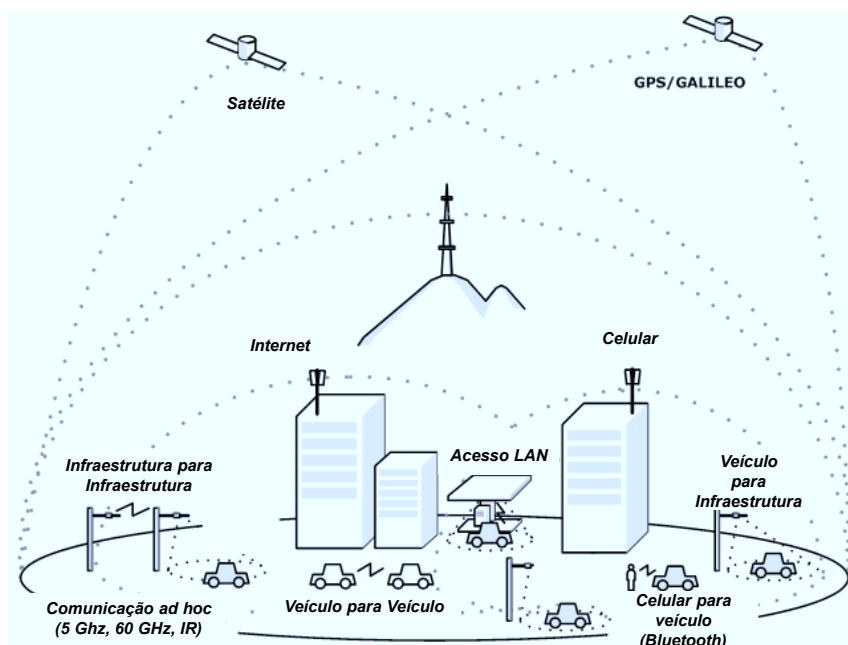


Figura 2: Arquitetura de uma ITS-S (adaptado de (ISO 21217, 2014)).

Estas comunicações de dados permitem uma variedade de aplicações. Por exemplo, na prevenção de acidentes, um veículo que necessita frear bruscamente pode enviar um alerta aos demais veículos que se aproximam para que estes reduzam suas velocidades e evitem colisões. Informações de mudanças temporárias no sentido de circulação de uma via ou informações de congestionamento em determinadas regiões podem ser difundidas a veículos que trafegam nas proximidades destas zonas. Veículos que trafegam nas proximidades de um determinado estabelecimento comercial podem receber mensagens sobre promoções, ou o próprio usuário pode procurar por determinado tipo de comércio (uma farmácia ou um supermercado) que esteja em funcionamento e nas proximidades do seu trajeto.

As aplicações possíveis são inúmeras e é crescente o desenvolvimento de soluções para ITS sendo realizados por uma grande variedade de empresas (SILVA et al., 2014). Para garantir a interoperabilidade entre estes diversos produtos e serviços, algumas organizações estão desenvolvendo padrões para sistemas ITS. A ISO desenvolveu uma arquitetura comum para estações ITS.

O padrão de arquitetura para estações ITS, definido pela ISO 21217 (ISO 21217, 2014), é baseado no modelo *Open Systems Interconnect* (OSI).

Esta arquitetura é composta pelas camadas e entidades listadas a seguir, as quais são

interconectadas via Serviço de Ponto de Acesso (SAP):

- Camada de Acesso de uma ITS-S, referida como *Access*: compõe as camadas 1 (Física) e 2 (Enlace) do modelo OSI;
- Camada de Rede & Transporte de uma ITS-S, referida como *Networking & Transport*: compõe as camadas 3 (Rede) e 4 (Transporte) do modelo OSI;
- Camada de Instalações de uma ITS-S, referida como *Facilities*: compõe as camadas 5 (Sessão), 6 (Apresentação) e 7 (Aplicação) do modelo OSI;
- Entidade de Gerenciamento de uma ITS-S, referida como *Management*: é uma entidade vertical responsável pelo gerenciamento da comunicação entre as diversas camadas de uma ITS-S;
- Entidade de Segurança de uma ITS-S, referida como *Security*: é uma entidade vertical que provê serviços de segurança para as demais entidades e camadas;
- Entidade de Aplicação de uma ITS-S, referida como *Application*: é uma entidade horizontal que usa a pilha de protocolos de comunicação e provê as interfaces homem-máquina (*Human-Machine Interface (HMI)*).

2.2 REDES DE COMUNICAÇÃO

Uma rede de comunicação é composta por um conjunto de dispositivos interligados entre si, que são capazes de trocar informações.

As redes de comunicação podem ser classificadas de diferentes modos. Por exemplo, quanto à sua arquitetura (Ethernet, Token ring, Frame Relay, ...), quanto a extensão geográfica (*Local Area Network (LAN)* ou Rede Local, *Metropolitan Area Network (MAN)* ou Rede Metropolitana, *Wide Area Network (WAN)* ou Rede de Grandes Áreas) e quanto a sua topologia (Rede em anel, em barramento, rede ad hoc).

A seguir é apresentada a rede VANET.

2.2.1 REDES VANET

A rede VANET é um subgrupo das redes MANET em que cada nó é representado por um veículo ou por um ponto de acesso da infraestrutura da via.

A comunicação entre os dispositivos de uma VANET é padronizada pela norma IEEE 802.11p, um ambiente veicular para acesso sem fio, também conhecido como *Wireless Access for Vehicular Environments* (WAVE). As comunicações no sistema ITS são realizadas usando a faixa de frequências de 5.9 GHz (IEEE COMPUTER SOCIETY, 2010). Esta faixa de frequências é subdividida em 7 canais de 10 MHz de largura de banda cada um (entre 5.85 e 5.925 GHz), alternados entre canais de serviço e de controle (EICHLER, 2007). Além do padrão 802.11p, a definição do WAVE é complementada pelo padrão IEEE 1609, sendo o padrão IEEE 1609.2 responsável pela segurança na comunicação; o padrão IEEE 1609.3 responsável por cobrir o gerenciamento e configuração das conexões e o padrão IEEE 1609.4 responsável pelas operações de múltiplos canais.

As principais características das redes VANET são (MICHOUUD et al., 2012):

- Topologia Dinâmica: os nós (veículos) podem alcançar grandes velocidades, o que faz com que em intervalos curtos de tempo eles possam se desconectar ou realizar novas conexões com outros dispositivos. Ao contrário das redes MANET, estes movimentos são realizados em direções bem definidas, pois seguem caminhos limitados por ruas e estradas;
- Redes sem infraestrutura: a comunicação veicular é baseada na arquitetura ad hoc, ou seja, sem a necessidade de um ponto de acesso principal (*Access Point* (AP)). Cada dispositivo na rede pode comunicar com outro, desde que apresentem potência em nível suficiente para ocorrer transmissão de dados;
- Rede descontínua: como consequência da topologia dinâmica da rede, um veículo pode facilmente se desconectar da rede. Isto pode fazer com que em determinados momentos um veículo ou parte da rede fique isolada do restante da mesma.

Em redes VANET, cada veículo pode desempenhar tanto a função de roteador como de um simples receptor. A comunicação entre os nós pode ocorrer de duas maneiras: V2V, quando a comunicação ocorre entre dois ou mais veículos ou V2I, quando a comunicação ocorre entre veículo e um dispositivo da infraestrutura da via, conforme mostrado na Figura 2.

Como já descrito anteriormente há inúmeras aplicações possíveis quando se usa comunicação de dados entre veículos. Estas aplicações podem ser divididas em três grupos principais (MICHOUUD et al., 2012):

- Segurança: aplicações que permitam uma maior segurança no trânsito como, por exemplo, na prevenção de colisões ou alerta sobre acidentes;

- Informação: aplicações que fornecem serviços de informações aos dispositivos da rede, por exemplo notificando sobre congestionamentos, informação de alteração no sentido de tráfego em vias públicas;
- Entretenimento: aplicações que propiciam entretenimento, tais como *video streaming*, acessos à internet, jogos em rede.

2.3 ALGORITMOS DE ROTEAMENTO

Existe uma variedade de algoritmos que descrevem a maneira com que os pacotes de dados devem ser transferidos em uma rede de comunicação. Segundo Saeed et al. (2012) estes protocolos de roteamento para redes ad hoc podem ser classificados em:

- *Design Philosophy*: é baseado em como as informações da rede são obtidas e mantidas pelos nós móveis da rede, podendo ser subdividida em Proativo, Reativo e Híbrido;
- *Network Structure*: é baseado na estrutura da rede, na relação existente entre os nós da rede. Pode ser subdividida em roteamento Uniforme, roteamento Hierárquico e roteamento assistido por *Global Positioning System (GPS)*;
- *Casting Packets*: é baseado em como os pacotes de dados são enviados, podendo ser subdividido em *Unicast, Multicast, Anycast e Broadcast*;
- *Network Routing Metrics*: esta classificação é baseada nas métricas usadas para roteamento, tais como número de saltos, estabilidade do link e congestionamentos.

A classificação baseada no *Design Philosophy*, também conhecido como *topology based routing protocols*, é a mais difundida. De acordo com esta classificação, os protocolos de roteamento podem ser classificados em Proativos, Reativos e Híbridos (GUPTA et al., 2011).

- Protocolos Proativos são também conhecidos como *Table-Driven routing protocols*. Com estes protocolos os nós trocam informações sobre a topologia da rede para manter a tabela de roteamento sempre atualizada. Isso minimiza o tempo de resposta para enviar uma mensagem, pois quando um nó necessita enviar uma mensagem para um determinado destino, não é necessário procurar pelo caminho. No entanto, há um aumento do congestionamento da rede devido aos envios frequentes de pacotes de controle.

- Protocolos Reativos são também conhecidos como *On-demand routing protocols*. Nestes protocolos o processo de procura por uma rota até o destino é iniciada somente quando um nó necessita enviar um pacote de dados e o caminho não é conhecido. Isto minimiza o tráfego de pacotes de controle na rede mas aumenta o tempo de entrega de pacotes para o destino.
- Protocolos Híbridos combina várias características dos protocolos Proativos e Reativos. Estes protocolos geralmente são usados para prover roteamentos hierárquicos, em que alguns nós processam maior quantidade de informação que os demais.

Há uma outra classificação de algoritmos baseada na forma com que as soluções são construídas, podendo ser determinístico ou heurístico. Os algoritmos são ditos determinísticos quando a solução calculada é a solução ótima e dependente somente dos valores de entrada. Os algoritmos são ditos heurísticos quando a solução é descoberta por meio da quantificação de proximidade a um determinado objetivo. Neste caso as soluções encontradas não necessariamente serão as soluções ótimas, podendo ser soluções aproximadas do ótimo (DORIGO; STUTZLE, 2004).

Em alguns tipos de problemas, encontrar uma solução satisfatória usando algoritmos determinísticos torna-se inviável, pois o espaço de possíveis soluções pode ser tão vasto que sua exploração levaria dias ou anos em processamento. Ou ainda, a solução ideal pode ser irrelevante para um determinado problema, sendo suficiente uma solução aproximada. Algoritmos heurísticos são comumente utilizados em problemas de otimização com alta complexidade e que requerem tempos de processamento muito grandes para a obtenção de soluções de boa qualidade. Uma área de pesquisa que trabalha bastante com este tipo de algoritmo é a Computação Evolucionária.

2.3.1 COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

A Computação Evolucionária é um ramo de pesquisa emergente da Inteligência Computacional que compreende um conjunto de técnicas de busca e otimização inspiradas na evolução natural das espécies, descrita por Charles Darwin (DORIGO; STUTZLE, 2004).

A Computação Evolucionária possui três ideias básicas (MELANIE, 1998): a criação de uma população de soluções iniciais, a existência de uma função de avaliação destas soluções e a execução de operadores que modificam estas soluções (por exemplo, mutação e cruzamento).

O principal algoritmo pesquisado em Computação Evolucionária é o Algoritmos Genético (AG), criado por John Holland na Universidade de Michigan (EUA) na década de 60. O método

de AG consiste em representar possíveis soluções de um problema como sendo uma população de “cromossomos”(strings de zeros e um). Então aplica-se os processos naturais da evolução de uma população, ou seja, processo de competição pela sobrevivência entre indivíduos de uma mesma população na qual os indivíduos mais aptos terão maior chance de gerar descendentes, ao passo que os indivíduos menos aptos tendem a ser extintos. Outro algoritmo bastante pesquisado em Computação Evolucionária é a Programação Genética (PG), que consiste em uma técnica de indução de programas (BANZHAF et al., 2000).

Outras concepções de meta-heurísticas relacionadas com a Computação Evolucionária vem sendo estudadas, como é o exemplo dos algoritmos baseados em inteligência de enxames: o algoritmo de otimização baseado em colônias de formigas (ACO), o algoritmo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* (PSO)), baseado no movimento sincronizado dos cardumes de peixes e revoadas dos pássaros, e o algoritmo *Artificial Bee Colony* (ABC), baseado no comportamento das abelhas (MOTIHAN et al., 2011) (LIANG et al., 2013).

A seguir será apresentado uma destas categorias de algoritmos heurísticos: o ACO. Esta foi a categoria usada no presente trabalho pois o ACO é indicado para este tipo de problema em que o objetivo é otimizar caminhos em redes que podem ser representadas por grafos, como é o caso das redes VANET em que os veículos representam os vértices e as conexões entre veículos representam as arestas deste grafo.

2.3.1.1 ACO - ANT COLONY OPTIMIZATION

As formigas são insetos que vivem em colônias e apresentam uma grande capacidade de se organizarem e executarem tarefas complexas. Observações do comportamento das formigas, tais como a busca por alimentos, divisão de trabalhos e transporte cooperativo, inspiraram estudos na área da computação. Assim, foram criados modelos que replicam tais comportamentos para coordenar formigas artificiais, permitindo a solução de problemas computacionais (DORIGO; STUTZLE, 2004).

É sabido que as formigas não possuem uma visão apurada, sendo algumas espécies totalmente cegas. Portanto, a principal forma de comunicação entre elas é através de comunicação indireta (estigmergia), ou seja, através de substâncias químicas que depositam pelo caminho por onde passam. Estas substâncias químicas são denominadas de feromônios e, ao serem depositadas no caminho por onde uma formiga trafega, aumentam a probabilidade de que outras formigas escolham este mesmo caminho para trafegarem (DENEUBOURG et al., 1990) (GOSS et al., 1989).

Como exemplo, pode-se analisar uma colônia de formiga que inicia suas buscas por alimento em um ambiente conforme diagrama mostrado na Figura 3. É considerado que o ninho das formigas está localizado no ponto A e o alimento no ponto C da referida figura, as formigas se locomovem sempre com a mesma velocidade, existe somente dois caminhos possíveis do ninho até o alimento e estes caminhos descrevem um triângulo equilátero de lado l . Portanto os caminhos possíveis são:

- $A \rightarrow B \rightarrow C$ - com comprimento total igual a $2l$;
- $A \rightarrow C$ - com comprimento total igual a $1l$.

No momento em que as primeiras formigas saem à procura de alimento não há feromônio depositado nos caminhos e, portanto, todos parecem idênticos à elas. As formigas escolhem aleatoriamente entre os dois caminhos. Assumindo que as duas primeiras formigas ao saírem do ninho escolham caminhos diferentes, a formiga que escolheu o caminho mais curto, a qual denominaremos formiga 1, é a primeira a chegar ao alimento no ponto C, neste instante a formiga que escolheu o caminho mais longo (formiga 2) ainda está na metade do seu trajeto (no ponto B), conforme mostrado na Figura 3a. A formiga 1, que já encontrou o alimento, retorna ao ninho sempre depositando feromônio por onde passa, e ao chegar ao ninho, a formiga 2 terá chegado ao alimento no ponto C, conforme Figura 3b. É fácil perceber que neste momento o caminho $A \rightarrow C$ tem uma concentração na sua trilha de feromônio que é o dobro da concentração do caminho $A \rightarrow B \rightarrow C$. Portanto, a próxima formiga que sairá do ninho em busca de alimento, tende a escolher o caminho com maior concentração de feromônio depositado. Esta formiga, ao passar por este caminho, fará uma retroalimentação positiva, depositando ainda mais feromônio. Assim, um caminho com alto tráfego de formigas possui uma alta concentração de feromônio, enquanto que em um caminho com baixo tráfego de formigas o feromônio tende a extinguir devido à evaporação.

Vários pesquisadores fizeram experimentos que mostram tal interação entre as formigas, como por exemplo, os experimentos executados por Deneubourg et al. (1990) e Goss et al. (1989), onde foram colocadas duas pontes ligando uma fonte de alimento ao ninho de uma colônia de formigas da espécie “Formigas Argentinas” (*Iridomyrmex humilis*). Os experimentos foram conduzidos variando a razão dos comprimentos entre as duas pontes e observando o comportamento das formigas na escolha do caminho entre ninho e alimento. Foi observado que, com o passar do tempo, as formigas tenderam a trafegar pelo caminho mais curto entre o ninho e a fonte de comida. Estes experimentos mostram que as colônias de formigas têm a capacidade de otimização.

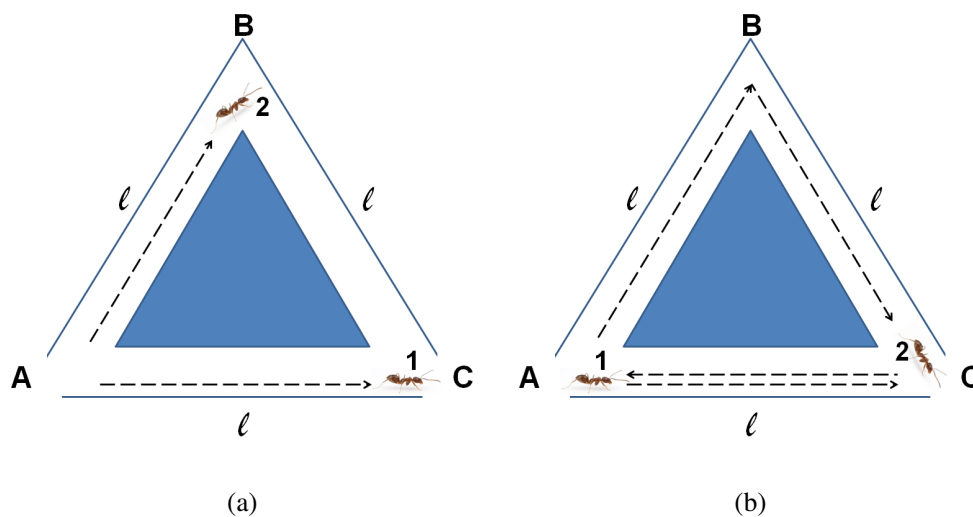


Figura 3: Modelo para análise do movimento de formigas entre Ninho (A) e Alimento (C).

Extrapolando para a área computacional, pode-se representar um problema por um grafo $G = (N, A)$, onde N é o número de nós e A o número de arestas deste grafo, e imaginá-lo como sendo um ambiente populado por formigas artificiais em que o nó origem corresponde ao ninho, o nó destino corresponde à fonte de alimento e as arestas correspondem aos caminhos possíveis entre origem e destino, conforme mostrado na Figura 4. Desta maneira pode-se obter o caminho mais curto entre dois nós de um grafo tomando por base o comportamento das formigas.

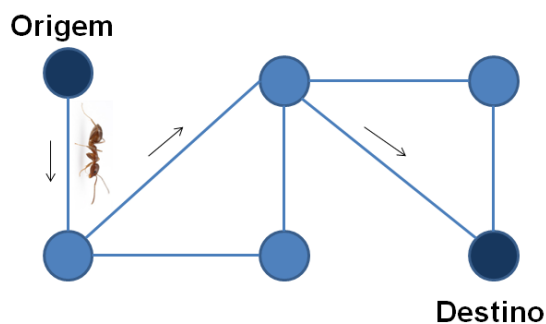


Figura 4: Exemplo de caminho em um Grafo.

Na solução de problemas, muitas vezes não se deseja encontrar a menor distância entre dois pontos de um grafo mas, sim, otimizar (maximizar ou minimizar) outras grandezas, tais como o tempo de deslocamento, a qualidade do percurso, a capacidade e estabilidade do caminho. Neste caso, ao invés de considerar o comprimento da aresta, associa-se à ela um custo que representa as grandezas a serem otimizadas.

O primeiro algoritmo baseado no comportamento das formigas foi o *Ant System* (AS),

criado por Dorigo e Stutzle (2004). Ele simula o comportamento das formigas reais criando formigas artificiais para solucionar problemas de caminho de menor custo em grafos. Para cada arco (i, j) em um grafo $G = (N, A)$ é atribuída uma concentração de feromônio artificial $(\tau_{i,j})$, que é depositado ou lido pelas formigas proporcionalmente ao custo da aresta (i, j) .

Assim como no mundo real, a probabilidade de uma formiga escolher um determinado caminho é proporcional à concentração de feromônio neste caminho e é dado pela Equação 1:

$$P_{i,j} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in V_i} [\tau_{ik}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (1)$$

onde $P_{i,j}$ é a probabilidade de escolher o caminho entre os nós i e j , τ_{ij} é a quantidade de feromônio depositado entre os nós i e j , V_i são os vizinhos do nó i , η_{ij} é a parte heurística do problema e α e β são parâmetros que determinam a influência do feromônio e da parte heurística, respectivamente.

Uma vez que a escolha da rota é probabilística, caminhos com baixa qualidade podem eventualmente ser escolhidos. No entanto, mecanismos de evaporação do feromônio podem auxiliar as formigas a “esquecerem” tais caminhos. Portanto, a concentração de feromônio é dada pela Equação 2, onde ρ é o coeficiente de evaporação ($0 < \rho < 1$), m é o número de formigas e $\Delta\tau_{i,j}^k$ é a concentração de feromônio depositado por cada formiga k ao passar pela aresta i, j :

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k \quad (2)$$

2.4 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Problemas que objetivam encontrar o menor caminho ou o caminho menos custoso levando em consideração um único objetivo é um assunto clássico em literaturas de problemas de otimização. No entanto, em problemas reais normalmente pode ser necessário considerar mais de um objetivo que, na maioria das vezes, podem ser conflitantes entre si. Um exemplo de problema real com objetivos conflitantes pode ser ilustrado pela tarefa de comprar um computador, em que se busca minimizar o custo maximizando o desempenho do equipamento. Outro exemplo pode ser a determinação da espessura e material das chapas metálicas na construção de um automóvel em que se deseja o menor custo de produção, a máxima resistência a colisões e o menor peso total do veículo.

Nestes tipos de problemas não existe uma solução ótima que satisfaça todos os objetivos simultaneamente. Mas o que se tem é um conjunto de possíveis soluções que apresentam o

melhor compromisso entre os diversos objetivos do problema. Para tanto, utiliza-se o conceito de “soluções ótimas de Pareto”.

2.4.1 SOLUÇÕES ÓTIMAS DE PARETO

Soluções ótimas de Pareto é um conceito originalmente desenvolvido para a área de Economia, que corresponde o estado de equilíbrio entre objetivos concorrentes, a partir do qual alterações mutuamente benéficas não são possíveis. Ou seja, não é possível melhorar a situação de um objetivo sem prejudicar a situação de outro (LEGRIEL et al., 2010).

Como descrito em Caramia e Dell’Olmo (2008), dado um conjunto S (denominado espaço objetivo) contendo as possíveis soluções que atendam aos objetivos e restrições do problema, um vetor x^* , pertencente ao espaço objetivo, é dito ótimo de Pareto para um problema multiobjetivo de minimização se todos os outros vetores x pertencentes ao espaço objetivo apresentam um valor maior para, no mínimo, uma das funções objetivos. Ou seja, $f_i(x^*) < f_i(x)$ para todo $i \in \{1, \dots, n\}$, onde n é o número de funções objetivo do problema.

A imagem de todas as soluções ótimas de Pareto no espaço das funções objetivo é denominada de curva ou frente de Pareto. Os pontos que delimitam a curva de Pareto são denominados pontos não dominados.

A Figura 5 mostra um exemplo de curva de Pareto para um problema de minimização com duas funções objetivo $f_1(x)$ e $f_2(x)$. Os pontos A e B indicam os valores mínimos para as funções $f_1(x)$ e $f_2(x)$, respectivamente. A curva entre os pontos A e B é denominada curva de Pareto ou Fronteira de Pareto. A curva de Pareto pode ser convexa, quando a tangente à qualquer ponto desta curva intercepta somente pontos que possuem o mesmo valor de tangente, conforme mostrado na Figura 5a. A curva de Pareto pode ser concavo (ou não convexa), quando a tangente à um ponto da curva de Pareto intercepta ao menos um ponto da curva pertencente à outra tangente, conforme mostrado na Figura 5b, em que a tangente ao ponto C intercepta o ponto D, tangenciado por outra reta.

Em alguns casos, calcular a fronteira de Pareto é computacionalmente custoso (DARUWALA, 2002). Portanto, para resolver estas categorias de problemas se faz necessário utilizar técnicas de aproximação à curva de Pareto. A seguir são apresentadas alguns destes métodos de otimização multiobjetivos.

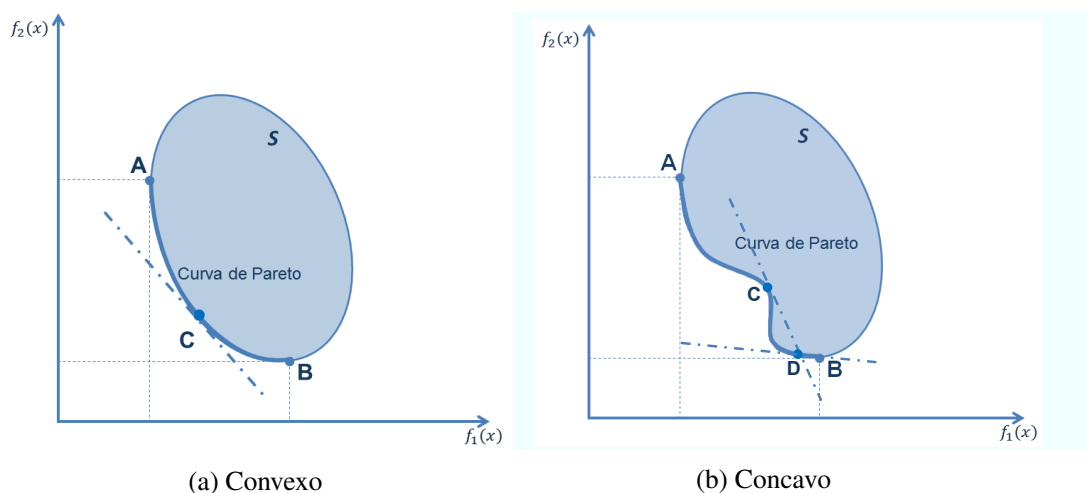


Figura 5: Exemplo de curva de Pareto (problema de minimização).

2.4.2 MÉTODOS PARA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Segundo Cohon (2004), os métodos de otimização multiobjetivo podem ser classificados em dois tipos, de acordo com o fluxo de informação entre o analista, que gera as soluções eficientes do problema e o tomador de decisão, que recebe as soluções geradas pelo analista e escolhe a que melhor atenda às necessidades do problema:

- Fluxo de informação do tomador de decisão para o analista (*top-down*) - nestes métodos o tomador de decisão informa suas preferências (por exemplo a prioridade por algum objetivo) ao analista, as quais serão consideradas na geração das soluções eficientes;
- Fluxo de informação do analista para o tomador de decisão (*bottom-up*) - os métodos desta categoria são também conhecidos como *Métodos de Geração*. Nestes métodos o analista gera as soluções sem receber informações do tomador de decisão.

A seguir são listados alguns métodos que podem ser usados pelo analista para gerar as soluções do problema.

2.4.2.1 MÉTODO DOS PESOS

O método dos Pesos é um dos métodos mais comuns em solução de problemas multi-objetivo. Ele combina os múltiplos objetivos em uma única função F , atribuindo um peso w_i a cada função objetivo (f_i), tal que $w_i \geq 0$ e $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. Portanto, o problema torna-se a minimizar ou maximizar a função final (F) gerada, conforme mostrado na Equação 3, onde n é o número

de objetivos do problema.

$$F = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x) \quad (3)$$

A grande vantagem deste método é a sua simplicidade. No entanto, o peso de cada função deve ser configurado de forma que a função reproduza uma superfície de Pareto representativa, ou seja que as soluções encontradas estejam distribuídas ao longo da superfície de Pareto, porém este processo não é trivial. Conforme demonstrado por Das e Dennis (1997), este método mostra-se ineficaz para problemas em que as soluções eficientes não são convexas no espaço objetivo.

2.4.2.2 MÉTODO NISE

O método *NonInferior Set Estimation* (NISE) (COHON et al., 1979) é um método utilizado em problemas nos quais o conjunto de soluções viáveis no espaço objetivo é convexo. Este método combina o método dos pesos, fazendo um controle de aproximação à fronteira através de um valor predefinido pelo analista, chamado de erro máximo permitido.

Para uma melhor compreensão deste método, será considerado um problema com dois objetivos no qual o espaço objetivo está mostrado na Figura 6. O método NISE inicia-se otimizando cada função objetivo individualmente e encontrando os pontos A e B indicados na Figura 6. Posteriormente encontra-se a solução ideal, ou seja, o ponto em que ambas as funções objetivos estariam nos seus valores mínimos, indicado como ponto C na Figura 6. O ponto C é a interseção dos segmentos de reta \overline{AC} e \overline{CB} . Estes segmentos possuem coeficientes angulares definidos pela razão dos pesos usados para encontrar tais pontos ($-w_1/w_2$). O erro máximo permitido é definido como sendo a altura do triângulo formado pelos pontos A , B e C .

A cada iteração utiliza-se o método dos pesos para encontrar novas soluções. Os novos pesos são definidos de tal forma a respeitar a mesma inclinação do segmento de reta \overline{AB} . O algoritmo é executado até que o erro calculado para cada par de solução adjacente seja menor ou igual ao erro máximo permitido.

Como este método utiliza o método dos pesos para encontrar as soluções, ele também não é eficaz para problemas em que as soluções não são convexas.

2.4.2.3 MÉTODO DA ε -RESTRICÇÃO

Neste método de minimização (CARAMIA; DELL'OLMO, 2008), é escolhido um dos n objetivos para ser minimizado e os demais são limitados a um determinado valor definido pelo

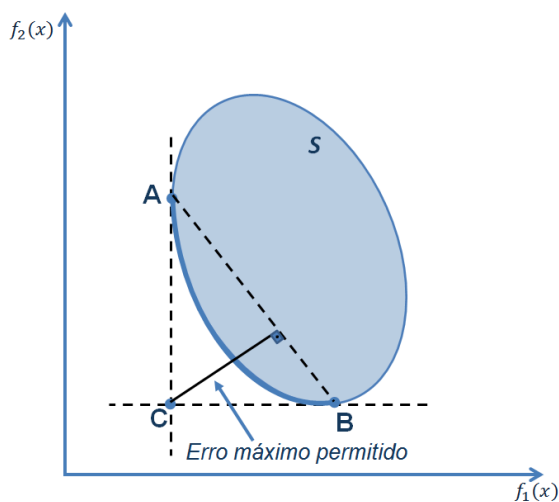


Figura 6: Exemplo do Método NISE.

tomador de decisão (ϵ), conforme mostrado na Figura 7.

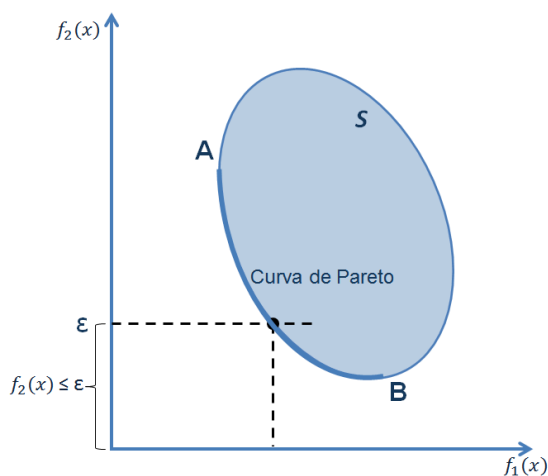


Figura 7: Exemplo do método ϵ -Restrição.

Este método apresenta a vantagem de trabalhar com problemas cujas soluções sejam convexas ou não convexas. No entanto, a escolha do vetor ϵ não é trivial. Dependendo da escolha do ϵ a solução do problema pode ser inviável.

2.5 SIMULADORES DE REDE E MOBILIDADE

Desenvolver e testar redes VANET reais requer um alto investimento financeiro, além de intenso trabalho de implantação e de grandes áreas disponíveis para a execução dos testes. Portanto, a simulação computacional é uma alternativa útil antes de uma implementação real.

É sabido que os modelos de mobilidade, modelos que descrevem o movimento dos veículos em uma área, e os modelos de propagação de sinais usados podem afetar os resultados de simulações (BENIN et al., 2012). Portanto, para se obter resultados mais fiéis é importante que os modelos usados representem, da melhor forma possível, o comportamento observado no mundo real.

Existe uma variedade de simuladores que são atualmente usados pelas comunidades científicas para simulação de VANETs . Estes simuladores podem ser divididos conforme segue (HASSAN, 2009):

- Simuladores de Mobilidade:
 - *Communication in Ad hoc Networks for Ubiquitous Computing* (CanuMobiSim);
 - *MObility model generator for VEhicular networks* (MOVE);
 - *Vehicular ad hoc networks Mobility Simulator* (VanetMobiSim);

- Simuladores de Rede:
 - *Network Simulator* (NS);
 - *Global Mobile Information System Simulator* (GlomoSim);
 - *Quality Networking* (QualNet);

- Simuladores de Rede e Mobilidade:
 - *Traffic and Network Simulator environment* (TraNS);
 - *National Chiao Tung University Network Simulator* (NCTUns).

A seguir serão apresentados os dois simuladores escolhidos para uso neste trabalho: *NS* e *VanetMobSim*. Estas escolhas foram baseadas na frequência com que tais simuladores foram usados na literatura (SOUZA et al., 2013) (RANA et al., 2013) (CORREIA et al., 2011).

2.5.1 SIMULADORES DE REDE (NS-3)

Na propagação de sinais em ambiente de rádio móvel, as ondas eletromagnéticas transmitidas interagem com as irregularidades do ambiente, tais como obstáculos e topografia do terreno, gerando diversas ondas que podem apresentar amplitudes e fases diferentes. Estas ondas, provenientes de diferentes caminhos somadas a ruídos no canal de transmissão, atingem o receptor e geram uma onda resultante que provoca desvanecimento na potência do sinal recebido.

Para simular este comportamento no ambiente de propagação sem fio, o simulador de rede escolhido no presente trabalho foi o *Network Simulator 3* (NS-3), devido seu grande uso na comunidade científica. O desenvolvimento deste simulador iniciou-se em 2006 e sua primeira versão (NS-3.1) foi lançada em 2008. O núcleo do NS-3, assim como seus modelos de propagação são implementados em linguagem C++. Ele é construído como uma biblioteca e, portanto, pode ser chamado a partir de um programa principal escrito em C++.

Este simulador possui modelos para TCP/IP, *Wireless Fidelity* (WiFi), *Optimized Link State Routing Protocol* (OLSR), *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA), rede ponto-a-ponto, dentre outros (GUSTAVO et al., 2009).

O NS-3 possui 11 modelos de propagação, que podem ser classificados em três categorias (STOFFERS; RILEY, 2012):

- Modelos de propagação Abstratos:
 - Nível fixo de sinal recebido (*FixedRssLossModel*): a potência do sinal recebido é fixada em um valor pré-definido e independente da distância;
 - Modelo matricial: o nível do desvanecimento do sinal propagado é fixado entre cada par de nós;
 - Alcance máximo (*RangePropagationLossModel*): é determinado um alcance máximo para o sinal, dentro do qual é possível ocorrer comunicação;
 - Perda aleatória: a perda de propagação do sinal segue uma distribuição de probabilidade;
- Modelos de propagação Determinísticos
 - Modelo *COST-Hata*: um modelo baseado em vários experimentos usados para prever a perda de caminho em áreas urbanas;
 - Modelo de Propagação Livre (*Friis Propagation Model*): descreve a transmissão de sinal entre um objeto transmissor e um receptor, considerando que a comunicação entre eles ocorra em visada direta, ou seja, sem a presença de obstáculos. Este modelo é descrito matematicamente pela Equação 4, conhecida como equação de Friis (FRIIS, 1946):

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (4)$$

onde P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, d é a distância entre Transmissor e Receptor, L é o fator de perda do sistema (filtros, antenas) e P_r é a potência recebida;

- Modelo *Log Distance*: este modelo pressupõe que a perda do sinal é exponencialmente proporcional à distância entre o emissor e receptor. Este modelo é amplamente usado na literatura para simulações de comunicação sem fio, pois simula a perda de percurso de um sinal na presença de obstáculos, como prédios e veículos;
- Modelo *Three Log Distance*: este modelo é uma variação do modelo anterior (*Log Distance*) e aplica perdas diferentes para diferentes intervalos de distância. Este modelo considera três distâncias diferentes, formando quatro campos, conforme mostrado na Figura 8. Em cada campo é possível aplicar uma redução diferente no sinal. Este modelo é descrito matematicamente pela Equação 5 (BENIN et al., 2012);



Figura 8: Diagrama dos campos considerados pelo modelo de propagação *Three Log Distance*.

$$L = \begin{cases} 0 & d < d_0 \\ L_0 + 10n_0 \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) & d_0 \leq d < d_1 \\ L_0 + 10n_0 \log_{10}\left(\frac{d_1}{d_0}\right) + 10n_1 \log_{10}\left(\frac{d}{d_1}\right) & d_1 \leq d < d_2 \\ L_0 + 10n_0 \log_{10}\left(\frac{d_1}{d_0}\right) + 10n_1 \log_{10}\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + 10n_2 \log_{10}\left(\frac{d}{d_2}\right) & d_2 \leq d \end{cases} \quad (5)$$

onde L é a perda de percurso (dB), d é a distância entre as antenas (m), d_0, d_1 e d_2 são as distâncias que delimitam cada campo de propagação do modelo (m), n_0, n_1 e n_2 são os expoentes indicativos da severidade da interferência no sinal para cada campo e L_0 é a perda considerada à distancia de referência. Neste trabalho foi mantido o valor padrão do NS-3 para comunicações WAVE ($L_0 = 46,67$ dB).

- Modelo de Propagação de Dois Raios (*Two Ray Reflection Model*): consiste de uma superposição de dois sinais no receptor: um sinal em visada direta e, portanto, sem obstáculos, e outro sinal proveniente da reflexão do sinal com o solo, conforme mostrado na Figura 9.
- Modelos Estocásticos: Esses são modelos de desvanecimentos de sinal, que combinados com os modelos descritos anteriormente, aumentam o grau de realismo nas simulações

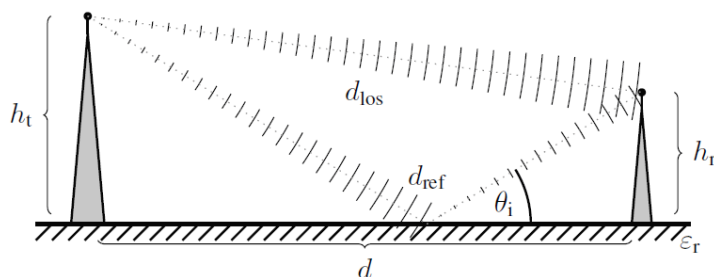


Figura 9: Modelo de Propagação de Dois Raios - fonte (SOMMER et al., 2012).

de transmissão de dados via rádio (comunicação *wireless*).

- Modelo de Jakes: este modelo calcula a perda de propagação modelando um conjunto de raios transmitidos do emissor para o receptor através de diferentes caminhos;
- Modelo de Nakagami- m : este modelo simula o sinal recebido de diversas fontes. Ele tem sido muito usado em simulações por ser o modelo que melhor se aproxima de dados reais como, por exemplo, para descrever a interferência de múltiplas fontes em sistema de comunicação celular. Neste modelo o desvanecimento do sinal segue a distribuição estatística de Nakagami, em que há dois parâmetros: o parâmetro m , que descreve a forma ou contorno da função densidade de probabilidade e um parâmetro que controla o espalhamento da distribuição. Para $m < 1$ o modelo é mais severo, considerando um alto desvanecimento por múltiplos percursos, e para m tendendo ao infinito ($m \rightarrow \infty$) o modelo é menos severo, reduzindo o desvanecimento por múltiplos caminhos e o canal tende a se comportar como puramente *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), ou seja, um canal em que o ruído segue uma distribuição normal e possui potência uniformemente distribuída em frequência.

Segundo Benin et al. (2012) alguns dos modelos oferecidos pelo NS-3 não são indicados para uso em VANETs, tais como os modelos *FixedRssLossModel*, *RangePropagationLossModel* e *COST Hata*. O NS-3 possui quatro modelos que podem ser aplicados em redes VANETs: *Log Distance*, *Three Log Distance*, *Friis*, e *TwoRayGround*. Esses quatro modelos podem ser combinados com os modelos de desvanecimento de sinal, tal como *Nakagami- m* , para simular ambientes de propagação mais realistas.

2.5.1.1 FLOW MONITOR

Flow Monitor é um *framework* para monitoramento de fluxos em uma simulação de rede, desenvolvido para o NS3 (GUSTAVO et al., 2009). Este módulo de monitoramento utiliza

sensores instalados em cada nó da rede, que permitem coletar e salvar um conjunto de métricas na simulação de uma rede, monitorando os fluxos que passam através dos nós (pacotes enviados, encaminhados, recebidos ou perdidos).

Os pacotes são rastreados no nível IP. Portanto, qualquer retransmissão de pacotes causada pelo protocolo em uso será considerado como um novo pacote pelo sensor e, assim, será contabilizado como tal.

Os dados coletados por cada fluxo são (GUSTAVO et al., 2009):

- *timeFirstTxPacket*: instante de tempo quando o primeiro pacote foi transmitido;
- *timeLastTxPacket*: instante de tempo quando o último pacote foi transmitido;
- *timeFirstRxPacket*: instante de tempo quando o primeiro pacote foi recebido por um nó destino;
- *timeLastRxPacket*: instante de tempo quando o último pacote foi recebido por um nó destino;
- *delaySum*: soma do atraso fim a fim para o conjunto de pacotes recebidos;
- *jitterSum*: soma da variação do atraso fim a fim para o conjunto de pacotes recebidos
- *txBytes, txPackets*: quantidade de *bytes* e pacotes transmitidos, respectivamente;
- *rxBytes, rxPackets*: quantidade de *bytes* e pacotes recebidos, respectivamente;
- *lostPackets*: quantidade de pacotes perdidos. Por padrão, um pacote desaparecido por um período acima de 10 segundos é considerado perdido (*MaxPerHopDelay*);
- *timesForwarded*: Quantidade de vezes que um pacote foi encaminhado;
- *delayHistogram, jitterHistogram, packetSizeHistogram*: Histogramas para atraso, variação de atraso e tamanho de pacotes, respectivamente;
- *packetsDropped, bytesDropped*: quantidade de pacotes e *bytes* perdidos, respectivamente, separados de acordo com o motivo (falta de caminho para o pacote, tempo de vida do pacote expirado, pacote corrompido).

2.5.2 SIMULADOR DE MOBILIDADE E TRÁFEGO (VANETMOBISIM)

O VanetMobiSim é um simulador de mobilidade veicular desenvolvido em Java (HARRI et al., 2009). Ele produz arquivos de rastreamento (*trace*) para simuladores de rede como o *Network Simulator 3*, *GloMoSim* e *QualNet*. Estes arquivos de rastreamento contêm informações como o ID de cada veículo, o tempo da simulação, a posição e velocidade de cada veículo no decorrer do tempo.

O *VanetMobiSim* suporta integração de mapas do tipo *Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing* (TIGER), fornecidos pelo *US Census Bureau*, a agência governamental encarregada pelo censo nos Estados Unidos (HARRI; FIORE, 2006). A versão 2.0 do *VanetMobiSim* oferece suporte para mapas *Open Street Maps* (OSM), permite a manipulação de semáforos, assim como oferece vários modelos de mobilidade, tais como *Intelligent Driver Model with Intersection Management* (IDM-IM) e *Intelligent Driver Model with Lane Changes* (IDM-LC).

O modelo IDM-IM é um modelo que combina o comportamento do modelo IDM (*Intelligent Driver Model*), o qual adapta a velocidade dos veículos dependendo do movimento entre veículos vizinhos, com a capacidade de gerenciamento inteligente nas intercessões. Este gerenciamento nas intercessões consiste em reduzir a velocidade dos veículos e pará-los ao se aproximarem de cruzamentos, assim como fazer com que os veículos respeitem os sinais dos semáforos, se presentes.

O modelo IDM-LC possui as funcionalidades do modelo IDM-IM, acrescentando a funcionalidade de mudança de vias e, permitindo assim, a realização de ultrapassagens.

O *VanetMobiSim* permite configurar ruas com várias vias, diferentes sentidos de circulação e com diferentes limites de velocidade. Para cada veículo é possível realizar diversas configurações, como suas velocidades mínima e máxima, aceleração e desaceleração.

2.6 TRABALHOS CORRELATOS

Foi realizada uma busca na literatura por trabalhos que aplicaram algoritmos baseado em ACO para roteamento em redes VANET e foi observado uma grande variedade destes algoritmos. Nesta seção serão apresentados e descritos alguns deles e no final desta seção será apresentado um resumo com as principais variáveis utilizadas pelos protocolos no cálculo da concentração de feromônios.

2.6.1 MAV-AODV

O *Multicast with Ant Colony Optimization for VANETs based on MAODV (MAV-AODV)* (SOUZA et al., 2013) é um protocolo de roteamento reativo baseado no protocolo MAODV e desenvolvido para VANETs.

Neste protocolo os veículos enviam mensagens *multicast* de controle, ou seja, para determinados grupos de veículos. Estas mensagens de controle têm o intuito de reunir informações de mobilidade dos veículos vizinhos. Uma vez recebidas estas informações, um veículo utilizando o protocolo MAV-AODV, calcula uma previsão do posicionamento dos veículos em seu entorno para determinado instante de tempo.

Apesar do protocolo MAV-AODV ser reativo, ou seja, o processo de procura por rotas é iniciado somente no momento em que uma mensagem de dados deve ser enviada, as mensagens de controle e cálculos de posicionamento dos veículos são realizados em intervalos periódicos de tempo para que o algoritmo tenha o histórico da movimentação da rede e, então, possa estimar a tendência de estabilidade dos links. Portanto, além de manter um fluxo periódico de mensagens na rede, este algoritmo ocupa tempo de processamento em cada veículo.

Com a informação do posicionamento de cada veículo em determinados intervalos de tempo é possível estimar o tempo de vida de um determinado link. Este tempo de vida de cada link, juntamente com o número de saltos em uma determinada rota são as variáveis usadas pelo ACO para a deposição de feromônio em cada rota.

As simulações deste protocolo foram realizadas usando um único cenário de dimensão $1600\text{ m} \times 1500\text{ m}$, composto por ruas verticais e horizontais. Cada rua possui dois sentidos para cada direção, ou seja, sentido Norte e Sul para cada rua vertical e sentido Leste e Oeste para as ruas horizontais. Na simulação foram usados quatro quantidades diferentes de veículos, a saber, 25, 50, 75 e 100 veículos.

Os dois modelos de propagação usados foram o Modelo de Propagação Livre (*Friis Propagation Model*) e o Modelo de Propagação de Dois Raios (*Two Ray Reflection Model*). Portanto, não foram consideradas influências de obstáculos na propagação do sinal, exceto a reflexão da Terra já considerada no modelo *Two Ray*.

As comparações de desempenho do protocolo MAV-AODV foram realizadas apenas com o protocolo MAODV. Os resultados obtidos mostraram melhor desempenho do MAV-AODV em termos do atraso fim a fim, além de apresentar um menor congestionamento da rede.

2.6.2 MAZACORNET

O *Mobility Aware Zone based Ant Colony Optimization Routing for VANET (MAZACORNET)* (RANA et al., 2013) é um protocolo de roteamento híbrido desenvolvido para VANETs. Este protocolo utiliza o padrão de movimento dos veículos e suas velocidades para separá-los em zonas. O MAZACORNET possui uma parte proativa para encontrar rotas dentro de cada zona e uma parte reativa para encontrar rotas entre zonas.

Este protocolo, a exemplo do protocolo descrito anteriormente (MAV-AODV), calcula a estabilidade de um link, com base nas informações de mobilidade dos veículos vizinhos. Cada veículo é equipado com GPS para obter as informações de posicionamento e velocidade, as quais são compartilhadas entre os veículos de uma mesma zona. De posse destas informações cada veículo calcula a estabilidade da conexão e estima o tempo em que as conexões com os demais veículos permanecerão ativas.

Além da estabilidade das conexões, o protocolo MAZACORNET calcula a probabilidade de sucesso em receber uma mensagem de um determinado veículo, baseado na distância Euclidiana entre estes veículos.

Estas duas variáveis, a estabilidade dos links e a probabilidade de sucesso em receber uma mensagem, são usadas no cálculo da concentração de feromônio que será depositada em cada rota, objetivando maximizar a estabilidade das conexões e a probabilidade de recepção de mensagens.

Este processo ocorre periodicamente dentro de cada zona para manter a tabela de roteamento atualizada (característica proativa do protocolo). Quando uma mensagem deve ser enviada a um veículo destino que se encontra fora da zona à qual o veículo origem pertence, um processo de procura por rota entre zonas é iniciado (característica reativa do protocolo). Neste processo reativo são utilizadas as mesmas métricas do processo proativo realizado dentro das zonas.

As simulações de mobilidade dos veículos e de rede foram realizadas com os simuladores *VanetMobiSim* e *NS-2*, respectivamente. Foram usadas duas configurações de áreas: uma com as dimensões $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ com 25 veículos e outra com dimensões $1500\text{ m} \times 1500\text{ m}$ na qual as quantidades de veículos foram 25, 50, 75 e 100.

As comparações deste protocolo foram realizadas com os protocolos *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV)*, *Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)* e *Ad-hoc On Demand Multipath Distance Vector (AOMDV)*. Os resultados mostram que o MAZACORNET alcançou melhores resultados em termos do atraso fim a fim e de congestionamento.

2.6.3 ANTRS

O AntRS (SILVA et al., 2013) é um protocolo de roteamento proativo baseado no protocolo *AntSensor* (SILVA, 2008) e desenvolvido para VANETs.

Este algoritmo heurístico multiobjetivo utiliza técnicas do ACO para encontrar rotas considerando o melhor compromisso entre o caminho mais rápido e o caminho com menor probabilidade de desconexão.

O algoritmo AntRS considera que a rede VANET é homogênea, ou seja, que todos os veículos possuem a mesma capacidade física e não considera congestionamento da rede, portanto, o caminho mais rápido entre dois veículos é aquele com menor número de saltos. É definido também que a probabilidade de conexão entre dois veículos é diretamente proporcional à potência compartilhada na comunicação e, portanto, o link com menor probabilidade de desconexão é aquele com maior potência de comunicação. No entanto, esta potência não é medida e sim, calculada pelo algoritmo. Baseando-se na equação de Friis (Equação 4), em que a potência de comunicação é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os nós que se comunicam, o link que tenderá a permanecer mais tempo conectado será aquele com menor distância Euclidiana entre os veículos.

O AntRS é, portanto, um algoritmo multiobjetivo para problema de minimização, no qual o objetivo é minimizar o número de saltos e a distância Euclidiana entre veículos origem e destino.

A procura por rotas entre origem e destino começa com mensagens de controle sendo enviadas para veículos aleatórios na rede VANET. Informações da rede, como posições dos veículos e número de saltos dos caminhos percorridos, são coletadas pelas mensagens de controle. Com estas informações os veículos calculam o feromônio a ser depositado nas rotas encontradas por cada agente.

As simulações deste algoritmo foram realizadas considerando dois cenários, ambos compostos por uma área urbana de $20.000 m^2$, com ruas horizontais e verticais. Cada rua possui dois sentidos de tráfego e foi considerado 10 veículos distribuídos aleatoriamente dentro de cada área.

No primeiro cenário considerou-se uma área livre de obstáculos para comunicação. Portanto, a única limitação de comunicação entre os veículos é o alcance da antena, configurado para 250 metros.

No segundo cenário considerou-se a presença de obstáculos, tais como prédios, que

reduzem a potencia do sinal transmitido. Em tal cenário foi assumido que a potência transmitida entre dois veículos separados por um obstáculo é reduzida pela metade.

O algoritmo AntRS não foi comparado com outros algoritmos.

2.6.4 MAR-DYMO

O *Mobility-aware Ant Colony Optimization Routing - Dynamic MANET On-demand (MAR-DYMO)* (CORREIA et al., 2011) é um protocolo de roteamento reativo desenvolvido para VANETs e é baseado no protocolo DYMO.

No protocolo MAR-DYMO os veículos recebem informações de mobilidade da rede, tais como velocidade e posição dos veículos, através das mensagens de controle que são disseminadas. Com estas informações cada veículo calcula o tempo estimado que os links entre ele e os demais veículos vizinhos permanecerão conectados, assim como a probabilidade de sucesso no recebimento de mensagens. Estes cálculos são usados para determinar a concentração de feromônios que é depositada em cada rota.

As simulações deste protocolo foram realizadas usando uma área de dimensões 1600 m x 1500 m. Esta área é composta por ruas horizontais e verticais com dois sentidos cada, permitindo os veículos trafegarem em ambos sentidos. Foram realizadas simulações com as seguintes quantidades de veículos: 25, 50, 75, 100, 125 e 150.

As comparações deste protocolo foram realizadas com os protocolos AODV, DYMO e Ant-DYMO. Os resultados mostram que o protocolo MAR-DYMO teve bom desempenho em termos de atraso fim a fim e congestionamento.

2.7 PRINCIPAIS VARIÁVEIS USADAS EM ACO

Estes trabalhos descritos nas seções anteriores foram apenas os mais relevantes encontrados na literatura recente. A Figura 10 mostra um resumo em porcentagem das principais variáveis utilizadas pelos protocolos de roteamento baseados em ACO, para o cálculo da concentração de feromônio a ser depositado nos caminhos encontrados.

Observa-se pela Figura 10 que as duas variáveis mais utilizadas são o Tempo de Transmissão dos pacotes entre origem e destino, que é utilizada em 31% dos protocolos encontrados e o Número de Saltos realizado pela mensagem, que é utilizada em 27% dos protocolos.

A Figura 11 mostra um resumo em porcentagem dos protocolos mais utilizados na literatura para a comparação com os algoritmos baseados em ACO.

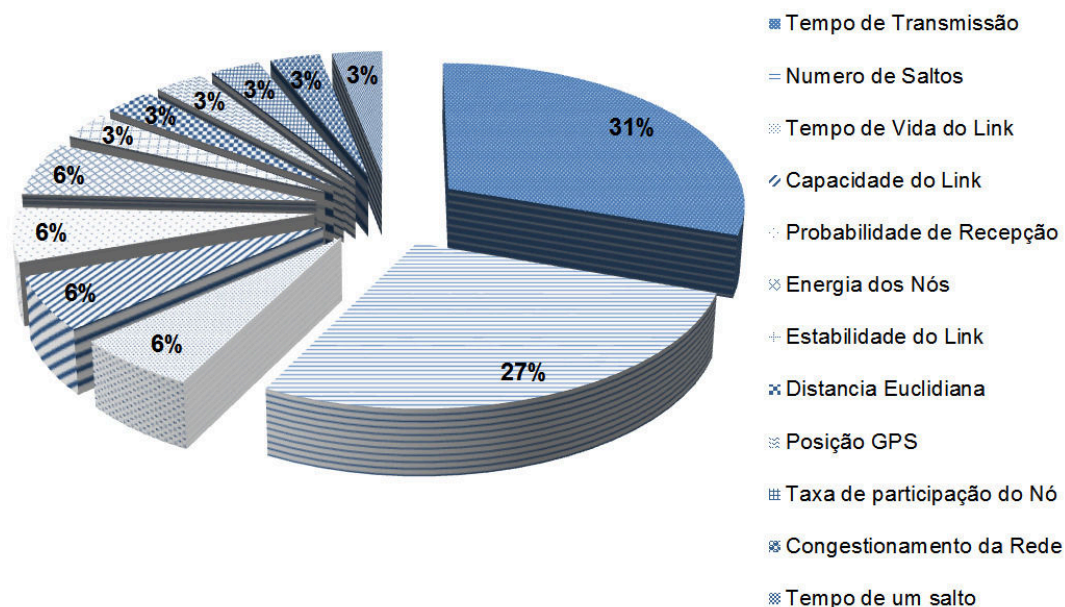


Figura 10: Principais variáveis utilizadas pelos protocolos baseados em ACO.

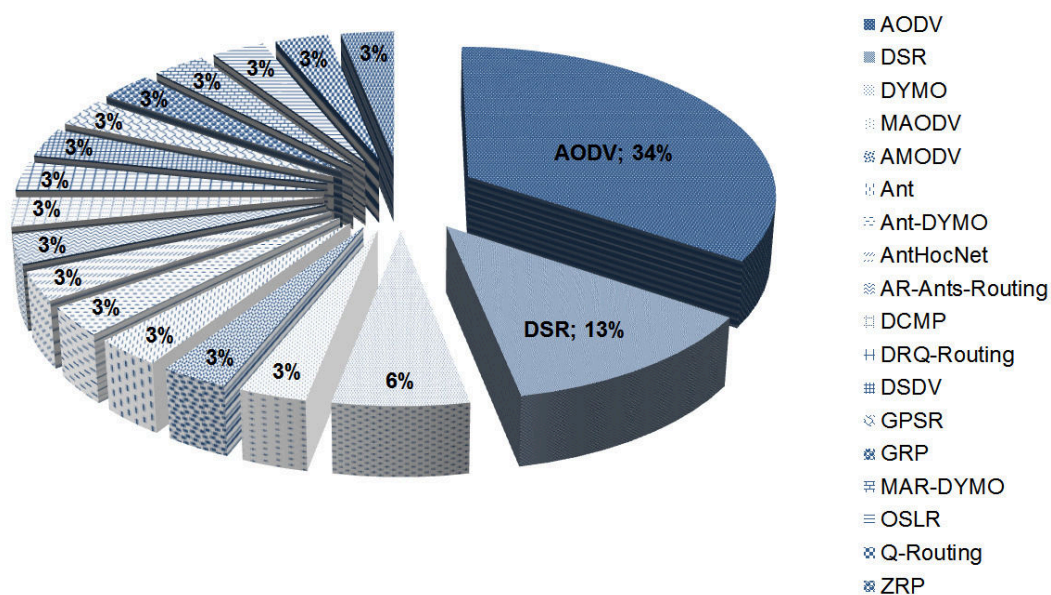


Figura 11: Protocolos mais utilizados na literatura para comparação com algoritmos ACO.

Observa-se que o protocolo mais utilizado para estas comparações é o AODV e está bem a frente do segundo protocolo mais utilizado (DSR).

Estas informações serão utilizadas posteriormente para o desenvolvimento deste trabalho.

3 METODOLOGIA

3.1 VISÃO GERAL DO PROJETO

Dada uma rede VANET, deseja-se encontrar o melhor caminho para trafegar dados entre dois veículos. Para tanto, foi aplicado um algoritmo determinístico para encontrar o caminho ótimo. Posteriormente foi desenvolvido e aplicado um algoritmo heurístico baseado em ACO para encontrar o melhor caminho nas mesmas condições e cenário do *benchmark* criado. Finalmente, foram comparados os resultados dos dois algoritmos.

Uma visão geral das simulações realizadas é mostrada no diagrama de blocos da Figura 12.

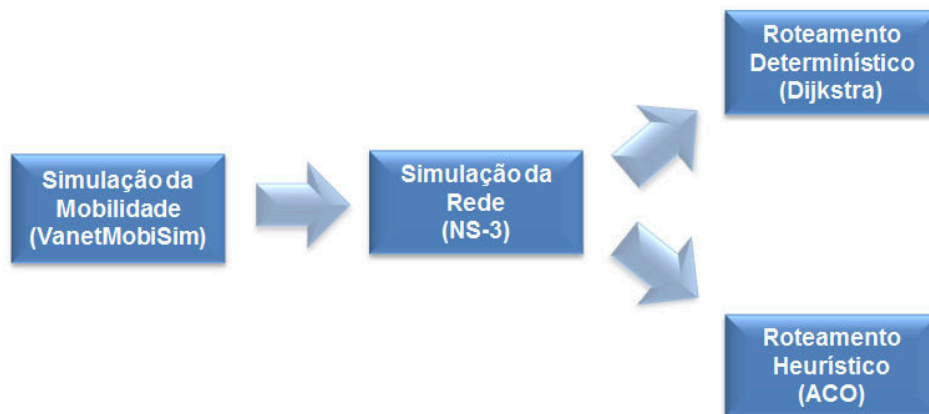


Figura 12: Diagrama em Bloco do Projeto.

Cada um dos blocos da Figura 12 é explicado na Seção 3.3. No entanto, antes de apresentar o ambiente de simulação é necessário definir os objetivos de melhor caminho, ou seja, é necessário definir as variáveis e a função objetivo que serão usadas durante as simulações.

3.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Ao procurar o melhor caminho em uma rede de dados, o primeiro questionamento que surge é a definição de melhor caminho, pois a qualidade de um caminho em uma rede de dados pode ser mensurada de diversas maneiras. O melhor caminho pode ser aquele mais curto, ou seja, que apresenta o menor número de saltos; pode ser o caminho menos congestionado; o caminho com menor probabilidade de desconexão; ou o caminho com menor perda de pacotes de dados; dentre outras métricas.

Durante a revisão da literatura (Capítulo 2) foram identificadas as métricas para avaliação de melhor caminho consideradas em cada trabalho. A Figura 10 mostra um gráfico com a frequência com que cada métrica foi usada. Analisando o gráfico observa-se que as duas métricas mais comumente utilizadas na literatura são:

- Número de Saltos: É o número de nós intermediários em um caminho entre origem e destino. Em um algoritmo de roteamento é desejável que este número de saltos seja minimizado, pois em cada nó intermediário o processo de recebimento e retransmissão da mensagem incrementa o atraso fim-a-fim da transmissão. O nó intermediário pode possuir outras mensagens aguardando retransmissão e esta espera na fila também contribui para o aumento do atraso da mensagem. Além disto, reduzindo o número de saltos reduz também a probabilidade de desconexão da rede por causa de falhas em algum nó intermediário ou arestas;
- Tempo de Transmissão: É o tempo total da transmissão de um mensagem, medido entre origem e destino. Em um cenário ideal, em que não há congestionamento dos nós entre origem e destino, esta variável é diretamente proporcional ao número de nós intermediários, ou seja, quanto menor o número de nós intermediários, menor será o tempo de transmissão. No entanto, em uma rede real em que alguns nós podem estar congestionados, ou os nós não tenham as mesmas características técnicas, não necessariamente o caminho com menor número de saltos será o que apresenta menor tempo de transmissão. Um caminho com maior número de saltos, mas que não esteja congestionado, pode apresentar um tempo de transmissão menor que um caminho que possui menor número de saltos mas cujos nós intermediários estejam congestionados.

Estas duas métricas estão presentes em mais de 50% dos trabalhos pesquisados e serão também utilizadas no presente trabalho. Portanto, trata-se de um problema de otimização multiobjetivo, no qual se deseja encontrar o caminho com menor número de saltos mas que tenha

também o menor tempo de transmissão dos pacotes de dados, ou seja, o melhor caminho será aquele que apresentar um melhor compromisso entre o número de saltos e o tempo de transmissão de dados. É adotado também que não há predileção por nenhum dos objetivos, ou seja, os dois objetivos possuem o mesmo nível de importância.

Ambas variáveis são discretas e, portanto, as soluções eficientes que constituem a fronteira de Pareto não necessariamente formam uma curva no espaço objetivo e, sim, pontos discretos.

3.2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelando matematicamente cada um destes objetivos, tem-se:

O número de saltos ($Nhops$) entre a origem (S) e destino (D) é definido como mostrado na Equação 6:

$$Nhops = \sum_{i=1}^N V_i, \quad V_i = \begin{cases} 1 & \text{se o nó for visitado} \\ 0 & \text{se o nó não for visitado} \end{cases} \quad (6)$$

onde N é o número de veículos na rede.

O tempo de transmissão (T_x) de pacotes é dado pela Equação 7:

$$T_x = \sum_{i=1}^A T_i, \quad T_i = \begin{cases} T_{NS3} & \text{se a mensagem trafegou pela aresta} \\ 0 & \text{se a mensagem não trafegou pela aresta} \end{cases} \quad (7)$$

onde, A é o número de conexões entre veículos e T_{NS3} é o tempo medido pelo NS-3.

Para combinar os dois objetivos em uma única função objetivo resultante, foi usado o Método dos Pesos, descrito na Seção 2.4.2.1. Portanto, aplicando a Equação 3, tem-se:

$$F_{Obj} = (cH \cdot Nhops) + (cT \cdot T_x) \quad (8)$$

onde F_{Obj} é a função objetivo, cH e cT são constantes que representam os pesos das funções número de saltos ($Nhops$) e tempo de transmissão (T_x), respectivamente.

Como não há uma predileção por nenhum dos objetivos, o peso de cada função será o mesmo. Pela definição do Método dos Pesos, em que $\sum Pesos = 1$, tem-se que $cT = cH = 0,5$.

As funções $Nhops$ e T_x não estão no mesmo intervalo, portanto devem ser normalizadas. Elas são normalizadas no intervalo $(0, 1]$, assim é necessário encontrar o máximo de cada função. O máximo da função $Nhops$ será $N - 1$, onde N é o número de veículos na rede

VANET, pois é o máximo de saltos que uma mensagem poderá realizar em uma rede, visitando cada veículo apenas uma vez. Para encontrar o máximo da função T_x seria necessário executar um algoritmo de maximização de caminho, no entanto, estes algoritmos possuem complexidade *NP-hard* (GAREY; JOHNSON, 1979). Foi realizada uma simplificação, adotando como valor máximo da função T_x como sendo a soma dos tempos de todas as arestas do grafo formado pela rede VANET.

Normalizando a Equação 8, tem-se:

$$F_{Obj(Norm)} = \left(cH \cdot \frac{Nhops}{N-1} \right) + \left(cT \cdot \frac{T_x}{\sum_{i=1}^N T_i} \right) \quad (9)$$

onde $F_{Obj(Norm)}$ é a função objetivo normalizada e N é o número de veículos na rede VANET.

A Figura 13 mostra o espaço objetivo de duas funções, espaço no qual encontram-se as soluções que satisfazem as funções objetivo do problema. Seja $f_1(x)$ e $f_2(x)$ as funções objetivo e S o conjunto de soluções do problema. Os pontos A , B e C representam uma solução do problema, a projeção desta solução na função $f_1(x)$ e a origem do espaço objetivo, respectivamente.

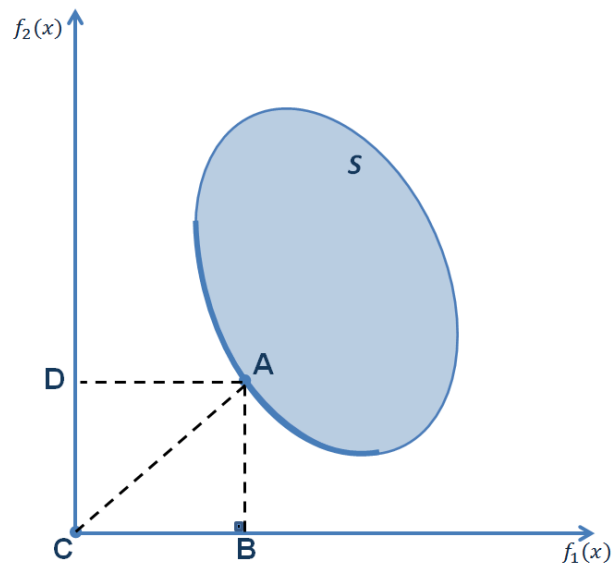


Figura 13: Distância Euclidiana entre solução e origem do espaço objetivo.

Considerando um problema em que se deseja minimizar ambas funções, e estas funções possuem a mesma importância (mesmo peso), observa-se que quanto mais próxima a solução estiver da origem neste espaço objetivo, mais próxima ela estará da solução que apresenta o

melhor compromisso entre as funções objetivo. Portanto, o problema torna-se em minimização do segmento de reta \overline{AC} que liga a origem do espaço objetivo a uma solução do problema, ou seja, minimização da distância Euclidiana entre os pontos A e C ($d_{\overline{AC}}$), dada pela Equação 10.

$$d_{\overline{AC}} = \sqrt{(\overline{AB})^2 + (\overline{BC})^2} \quad (10)$$

Assim, a função objetivo final foi definida como sendo a distância Euclidiana da solução encontrada até a origem do espaço objetivo. Com base na Equação 9 tem-se que a função objetivo final $F_{Obj(final)}$ a ser minimizada será dada pela Equação 11:

$$F_{Obj(final)} = \sqrt{\left(cH \cdot \frac{Nhops}{N-1}\right)^2 + \left(cT \cdot \frac{T_x}{\sum_{i=1}^N T_i}\right)^2} \quad (11)$$

3.3 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Nesta seção são detalhados os blocos mostrados na Figura 12.

3.3.1 SIMULAÇÃO DE MOBILIDADE

Este bloco representa a simulação da mobilidade e simulação do tráfego veicular. Para executar tais simulações, foi usado o *VanetMobiSim*. Como apresentado na Seção 2.5.2, é um simulador de mobilidade veicular desenvolvido em Java que produz arquivos de rastreabilidade, os quais servirão como dados de entrada para simuladores de rede como o NS-3. A escolha deste simulador se deve ao fato de ser um simulador bastante usado na comunidade científica.

A seguir estão listados os principais parâmetros configurados no *VanetMobiSim* para cada cenário. Os valores de cada parâmetro estão definidos na Seção 3.4 :

- Área de simulação: as áreas foram desenhadas diretamente com a ajuda do próprio simulador ou foram importadas de mapas OSM;
- Número de Veículos: foram criados veículos estáticos e conjuntos de veículos móveis;
- Mobilidade: foi definido o modelo de mobilidade, no qual foi configurada a relação entre os veículos e entre veículos e a infraestrutura das vias. Por exemplo, o comportamento dos veículos frente a congestionamentos e em cruzamentos;

- Tempo de Simulação: foi definido o tempo de cada simulação em segundos;
- Velocidade dos veículos: definido velocidade máxima, mínima, aceleração e desaceleração de cada veículo, assim como seu posicionamento inicial na área de simulação.

Uma vez configurado o cenário, executou-se a simulação. O resultado final da simulação é um arquivo de rastreamento contendo, a cada instante de tempo em que cada veículo se moveu, as novas coordenadas x e y deste veículo, assim como a velocidade com que se movimentou, conforme mostrado na Figura 14.

```

$node_(20) set Y_ 1.0E-6
$node_(20) set Z_ 0.0
$node_(21) set X_ 600.000001
$node_(21) set Y_ 1.0E-6
$node_(21) set Z_ 0.0
$node_(22) set X_ 300.000001
$node_(22) set Y_ 300.000001
$node_(22) set Z_ 0.0
$node_(23) set X_ 600.000001
$node_(23) set Y_ 300.000001
$node_(23) set Z_ 0.0
$node_(24) set X_ 1.0E-6
$node_(24) set Y_ 1.0E-6
$node_(24) set Z_ 0.0
$ns_ at 0.0 "$node_(0) setdest 556.1296626430462 139.89299447848754 0.01"
$ns_ at 0.0 "$node_(1) setdest 281.8396101916002 574.5347838083029 0.01"
$ns_ at 0.0 "$node_(2) setdest 1.0E-6 600.000001 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(3) setdest 300.000001 600.000001 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(4) setdest 597.5653980300631 300.5680750263186 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(5) setdest 600.000001 2.500009441206457 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(6) setdest 2.434603969936865 599.4319269736814 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(7) setdest 1.0E-6 597.5000010558794 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(8) setdest 597.5000010558794 600.000001 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(9) setdest 2.500009441206457 1.0E-6 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(10) setdest 1.0E-6 597.5000010558794 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(11) setdest 1.0E-6 297.50000105587935 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(12) setdest 597.5000010558794 600.000001 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(13) setdest 597.5653980300631 0.5680750263186016 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(14) setdest 300.5680750263186 2.434603969936865 2.5"
$ns_ at 0.0 "$node_(15) setdest 600.000001 2.500009441206457 2.5"

```

Figura 14: Exemplo de arquivo de rastreamento do VanetMobiSim.

3.3.2 SIMULAÇÃO DE REDE

Este bloco representa a simulação do Tráfego de Dados na rede e o simulador escolhido foi o NS-3. A exemplo do simulador *VanetMobiSim*, a escolha do NS-3 foi baseada na sua popularidade na comunidade científica. O objetivo deste bloco é:

- ler o arquivo de rastreamento gerado pelo bloco anterior (*VanetMobiSim*);

- encontrar a vizinhança de cada veículo da rede;
- criar tráfego de dados nesta rede;
- medir o tempo médio de transmissão de pacotes de dados entre pares de veículos vizinhos.

Na implementação deste bloco, foi escrito um programa em C++ que inclui o NS-3 como uma das bibliotecas. Para o rastreamento dos dados da simulação foi usado o framework *Flow Monitor*, descrito na Seção 2.5.1.1.

A seguir estão listados os principais parâmetros configurados no NS-3 para cada cenário. Os valores destes parâmetro estão definidos na Seção 3.4 :

- Rede usada: nesta configuração foi usado WiFi 802.11p para todos os cenários;
- Propagação de rádio: para cada cenário foi definido o modelo de propagação a ser usado. O NS-3 oferece 11 modelos de propagação, conforme descrito na Seção 2.5.1. Durante as simulações foi observado que, ao criar o canal WiFi dentro do NS-3 com as configurações padrão do sistema, este já aplica uma atenuação no sinal transmitido. Portanto, para alterar o modelo de propagação da simulação, faz-se necessário não carregar as configurações padrão ao criar o canal, caso contrario haverá atenuações sobrepostas no sinal de saída.
- Protocolo de roteamento: é possível definir o protocolo de roteamento a ser usado. O NS-3 possui alguns protocolos já implementados, tais como OLSR, AODV, DSDV e DSR. Para o presente trabalho, é necessário ter um protocolo para roteamento dos dados, mas a escolha de qual protocolo a ser usado não tem grande interesse nesta etapa, pois o objetivo é preparar a rede para então aplicar os algoritmos determinístico e heurístico.
- Intervalos de tempo (*TimeSchedule*): A simulação de rede realizada pelo NS-3 é contínua durante todo o tempo de simulação previamente definido. Para analisar a rede em instantes específicos de tempo é necessário discretizar o resultado desta simulação. Para tanto, o framework *Flow Monitor* foi configurado para fornecer estatísticas da simulação em intervalos de tempo determinados pelo usuário (*TimeSchedule*).

Os resultados desta simulação são arquivos que representam o estado da rede para cada instante de tempo definido pelo usuário, com informações da vizinhança entre os veículos e o tempo médio de transmissão de dados entre os pares de veículos vizinhos, conforme mostrado na Figura 15.

| Nó A | Nó B | Tempo Transmissão |
|------|------|-------------------|
| 13 | 21 | 0.000346804 |
| 2 | 7 | 0.000354789 |
| 21 | 15 | 0.00110161 |
| 10 | 7 | 0.000365529 |
| 0 | 16 | 0.000366195 |
| 9 | 24 | 0.00030701 |
| 2 | 16 | 0.000399314 |
| 13 | 15 | 0.00198681 |
| 10 | 16 | 0.000366866 |
| 1 | 13 | 0.000855764 |
| 12 | 8 | 0.000269945 |
| 5 | 21 | 0.00233737 |
| 23 | 4 | 0.00152617 |
| 0 | 7 | 0.000559062 |
| 16 | 7 | 0.000350309 |
| 4 | 17 | 0.00050813 |
| 5 | 13 | 0.00184598 |
| 5 | 15 | 0.000555674 |
| 17 | 23 | 0.00160269 |
| 19 | 22 | 0.00176126 |
| 1 | 15 | 0.000777825 |
| 0 | 2 | 0.000302736 |
| 5 | 1 | 0.00109861 |
| 10 | 2 | 0.000328579 |
| 0 | 10 | 0.000335511 |
| 11 | 9 | 0.000544103 |
| 20 | 18 | 0.000216831 |
| 11 | 24 | 0.000326978 |
| 11 | 20 | 0.00113363 |
| 5 | 4 | 0.00047017 |

Figura 15: Exemplo de arquivo de rastreamento do NS-3.

Estes tempos foram obtidos através da variável *delaySum* do *Flow Monitor*. Como esta variável representa a soma do atraso fim a fim para o conjunto de pacotes recebidos, o tempo médio de transmissão é dado pela Equação 12, definida em Gustavo et al. (2009)

$$T_{medio} = \frac{delaySum}{rxPackets} \quad (12)$$

onde, o T_{medio} é o tempo médio de transmissão de dados entre os pares de veículos vizinhos e $rxPackets$ é a quantidade de pacotes recebidos.

3.3.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA

Neste bloco foi implementado o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) em C++, para encontrar o caminho ótimo entre dois veículos na rede VANET. O algoritmo de Dijkstra foi usado por ser um algoritmo indicado para o tipo de problema deste trabalho, em que se

deseja encontrar o caminho de menor custo entre dois nós do grafo formado pela rede VANET.

O algoritmo de Dijkstra é um algoritmo baseado no preceito de que os sub-caminhos pertencentes a um caminho mais curto é em si, um menor caminho. Ele é indicado para solucionar problemas em que o objetivo é encontrar caminhos de menor custo em grafos com arestas de pesos não negativos. A complexidade do algoritmo de Dijkstra é $O([m + n] \log n)$, onde m é o número de arestas e n é o número de vértices do grafo.

Para cada instante de tempo em que a rede foi discretizada, o algoritmo de Dijkstra recebe como dados de entrada o arquivo gerado pelo NS-3 e que representa a rede VANET neste momento determinado. Com base neste arquivo o algoritmo recria o grafo $G(V, A)$ da rede, onde V são os veículos representando os vértices do grafo e A são as indicações de vizinhança entre pares de veículos que representam as arestas do grafo. Cada uma destas arestas carregam consigo um custo $C(Hops, Time)$, onde $Hops$ representa o número de saltos e $Time$ representa o tempo médio para enviar um pacote de dados entre os dois vértices conectados por esta aresta.

O algoritmo de Dijkstra usado está mostrado no Algoritmo 1.

O algoritmo inicia-se no veículo origem (V_i) e o marca como visitado. Inicializa com infinito o custo de todos os demais veículos relativo ao veículo V_i ($C_{j,i}$). A cada passo busca nos veículos adjacentes aquele com menor custo relativo ao veículo V_i , o adiciona a um conjunto S de menores custos e o marca como visitado. O algoritmo é executado até que todos os veículos alcançáveis por V_i estejam em S . Arestas que ligam veículos já pertencentes a S são desconsideradas. A função objetivo para cálculo do custo de cada caminho é a Equação 11.

3.3.4 ANÁLISE HEURÍSTICA

Neste bloco é implementado um algoritmo heurístico baseado em ACO para encontrar o melhor caminho de comunicação de dados entre dois nós da rede.

Este bloco recebe como dado de entrada os arquivos de rastreamento do NS-3 a cada instante de tempo definido pelo usuário (*TimeSchedule*). Estes arquivos contém as informações de vizinhança e as medições de tempo médio de envio de mensagem entre os pares de nós vizinhos.

O objetivo deste bloco é montar o grafo que representa a rede veicular nos instantes de tempo considerados e então encontrar o melhor caminho para envio de mensagens entre uma fonte e destino.

O algoritmo heurístico usado aqui é uma variação do algoritmo AntRS (SILVA et al.,

Algorithm 1 Algoritmo Dijkstra

```

G(V,A) ← rede NS-3
Vi ← Veículo Origem
Vf ← Veículo Destino
N ← Número de veículos
para j = 0 → (N - 1) faça
  | Cj,i ← ∞
  | Vj ← Não Visitado
fim
VeiculoAtual ← Vi
Vi ← Visitado
enquanto ((G(V,A) ⊃ Veículos Não visitado) & (Vf Não visitado)) faça
  | para k = VeiculoAtual → Vizinhos faça
  | | Custo ← Calcula custo Vk em relação ao Vi (Equação 11)
  | | se Custo < Ck,i então
  | | | Ck,i ← Custo
  | | | ProximoVeiculo ← k
  | | fim
  | fim
  | VeiculoAtual ← ProximoVeiculo
  | VVeiculoAtual ← Visitado
fim

```

2013), que foi baseado no algoritmo AS, e é mostrado no Algoritmo 2.

Os principais passos do algoritmo AntRSV são:

- Ao receber os arquivos de rastreamento provenientes da execução do NS-3, o algoritmo monta o grafo que representa a rede veicular em simulação naquele instante;
- Inicialização da tabela de feromônio. Segundo o algoritmo AS (DORIGO; STUTZLE, 2004), uma boa concentração inicial de feromônio é um valor ligeiramente superior à concentração que seria depositada pelas formigas em uma interação. A razão deste valor é que se o feromônio inicial for muito pequeno, a solução tenderá seguir as rotas geradas pelas primeiras formigas, desta forma a exploração do espaço de busca que será realizada pelas formigas fica limitada. Por outro lado, se o valor inicial for muito alto, as primeiras interações não serão representativas, pois o excesso de feromônio pode mascarar a deposição de feromônio realizada pelas primeiras formigas. O valor inicial usado neste trabalho é o mesmo valor proposto por Dorigo e Stutzle (2004) e dado pela Equação 13.

$$Feromonio_{inicial} = \frac{m}{\rho \cdot C_{inicial}} \quad (13)$$

onde m é o número de formigas, ρ é o coeficiente de evaporação e $C_{inicial}$ é o custo de um

Algorithm 2 AntRSV

```

 $G(V,A) \leftarrow$  rede NS-3
 $V_i \leftarrow$  Veículo Origem
 $V_f \leftarrow$  Veículo Destino
 $N \leftarrow$  Número de veículos
 $ciclos \leftarrow$  Número de ciclos
 $Rodadas \leftarrow$  Número de rodadas
para  $i = 0 \rightarrow (N - 1)$  faça
  | Encontra os vizinhos do veículo ( $i$ )
  | Cria formigas
fim
para  $j = 0 \rightarrow Rodadas$  faça
  | inicializa feromônio
  | enquanto  $contador < ciclos$  faça
  |   | para  $k = 0 \rightarrow (N - 1)$  faça
  |   |   | Move formiga (Equação 1)
  |   |   | se formiga chegou no veículo destino ( $V_f$ ) então
  |   |   |   |  $formiga \leftarrow$  formiga em retorno
  |   |   |   | formiga retorna para a origem ( $V_i$ )
  |   |   |   fim
  |   |   | senão
  |   |   |   | Escolha o próximo destino
  |   |   |   | Envia formiga
  |   |   |   fim
  |   |   fim
  |   | Atualiza matriz de feromônio
  |   | Aplica evaporação de feromônio
  |   |  $contador ++$ 
  |   fim
  fim
fim

```

caminho inicial. Este caminho foi encontrado enviando uma formiga a partir do veículo origem, até que ela encontre o veículo destino. A escolha do caminho por esta formiga é função somente da parte heurística do problema.

- Envio das formigas artificiais. A escolha da rota a ser seguida por cada formiga é feita de acordo com a probabilidade dada pela Equação 1 (página 28), na qual a parte heurística é dada pelo inverso da função objetivo ($1/F_{Obj(final)}$), mostrada na Equação 11.
- Ao encontrar o nó destino, a formiga retorna ao nó de origem, tendo encontrado um caminho possível;
- A atualização da matriz de feromônio é feita com base em cada caminho encontrado pelas formigas. A concentração de feromônio na aresta (i, j) é dada pela Equação 2, onde $\tau_{i,j}(t) = 1/F_{Obj(final)}$ é a concentração de feromônio na aresta i, j e $F_{Obj(final)}$ é a função

objetivo dada pela Equação 11;

- A regra de evaporação do feromônio é aplicada segundo a Equação 2 (página 28), descrita na Seção 2.3.1.1;
- Estes envios e retornos das formigas são executados até que o número máximo de ciclos seja atingido.

3.3.5 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para realizar estas simulações foram utilizadas cinco (5) máquinas, cada uma processador Intel(R) Core(TM) i7 (4 núcleos e 8 *threads*), 3,5 GHz, memória RAM de 8GB e sistema operacional Ubuntu Server 12.04.

3.4 APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS A SEREM SIMULADOS

É sabido que quanto mais fiel à realidade for um cenário de simulação, maior será o número de variáveis a ser consideradas, podendo tornar a simulação impraticável. Portanto, faz-se necessário aplicar algumas restrições ao definir os cenários para as simulações. A seguir é apresentado um cenário de referência, no qual os cenários definidos neste trabalho foram baseados.

3.4.1 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

Este cenário não foi implementado, mas serviu de referência para as configurações dos cenários a serem simulados.

As configurações deste cenário de referência foram baseadas nos estudos de Harri et al. (2009), que descrevem alguns requisitos para dar maior realismo à modelagem de cenários que simulam redes VANET.

Este cenário foi caracterizado em termos das variáveis a seguir. Os valores de cada variável estão definidos na descrição dos cenários simulados e um resumo destes valores são mostrados na Tabela 1:

- Área de simulação: é a área em que os veículos serão monitorados, podendo ser obtida a partir de mapas, como *OSM* ou construída a partir de programação. Ela pode assumir tamanhos variados, podendo ser alguns quarteirões, um bairro ou mesmo uma cidade. As

Tabela 1: Síntese dos valores de cada parâmetro de configuração dos cenários.

| Parâmetros de Configuração dos Cenários | |
|--|---------------------------|
| Área (<i>m</i>) | 600 x 600 |
| Modelo de Mobilidade | IDM-LC |
| Modelo de Propagação | <i>Three Log Distance</i> |
| Pacotes de dados (<i>bytes</i>) | 512 |
| Taxa de transmissão (<i>bps</i>) | 16384 |
| Potência de transmissão (<i>dB</i>) | 16,0206 |
| Potência de recepção (<i>dB</i>) | -96 |
| Modelo de Desvanecimento | Nakagami-m |
| Velocidade dos veículos (<i>Km/h</i>) | 0 - 60 |
| Aceleração (<i>m/s²</i>) | 0,6 |
| Desaceleração (<i>m/s²</i>) | 0,9 |
| Tempo de simulação (<i>s</i>) | 200 |
| Número de veículos | 25, 50, 100, 200 e 400 |
| Protocolo de roteamento | AODV |
| Intervalo de tempo de simulação (<i>s</i>) | 2 |

ruas devem apresentar diferentes características, como múltiplas vias, capacidade para diferentes densidades veiculares, diferentes limites de velocidade, com limites de velocidades variáveis em função da hora do dia ou dia da semana;

- Mobilidade: é o modo de gerenciamento dos movimentos dos veículos dentro da área de simulação, tais como o comportamento dos veículos ao se aproximarem de outros veículos ou ao se aproximarem de cruzamentos. Cada veículo pode apresentar velocidade variável no tempo, o deslocamento pode ser limitado por obstáculos, como outros veículos estacionados e veículos lentos. A mobilidade deve considerar a possibilidade de parada de emergência do veículo (por exemplo, para passagem de pedestres ou para evitar acidentes), redução de velocidade ao se aproximar de áreas com maior fluxo de pedestres, controle de ultrapassagem, além do gerenciamento e tomada de decisão ao chegar em um cruzamento (aguardar, seguir em frente, virar à direita ou esquerda);
- Propagação dos sinais de rádio: é o modelo que descreve o comportamento do sinal transmitido, podendo ser um modelo simplesmente didático, no qual considera-se a propagação no espaço livre e sinal sem influências externas, ou um modelo mais realista em que é aplicado no sinal as atenuações provenientes da interferência de meios externos, como prédios, veículos e árvores. Vários fatores podem influenciar o sinal transmitido, como a presença de obstáculos, a velocidade dos veículos em comunicação, a potência do sinal transmitido, o alcance e ganho das antenas. Somado a estes fatores, é possível que a rede VANET seja heterogênea, ou seja, que cada veículo na rede possa estar equipado com

diferentes capacidades físicas (hardwares);

- Pacotes de dados: é a quantidade de *bytes* de dados enviados por cada mensagem;
- Taxa de transmissão: é a frequência com que os dados são enviados, medida em *bits* por segundo;
- Potência de transmissão: é a potência com que cada nó envia as mensagens;
- Potência de recepção: é o nível mínimo do sinal que será detectado na recepção;
- Modelo de desvanecimento: é o modelo que simula a atenuação do sinal;
- Número de veículos: é o número de veículos presentes dentro da área de simulação. Em uma rede real é desejável que o número de nós possa ser variável no tempo, ou seja, veículos possam entrar ou sair da área de cobertura da rede a qualquer instante da simulação;
- Velocidade dos veículos: descreve o movimento dos veículos, que podem estar estacionados ou em movimento. Neste último caso, indicando sua velocidade mínima, máxima, aceleração e desaceleração. Cada veículo pode escolher a velocidade dentro do limite permitido pela via, levando em consideração a presença ou não de obstáculos a sua frente. Deve-se ainda considerar a aceleração e desaceleração de cada veículo, pois no mundo real um veículo não para abruptamente sem que haja um deslocamento até sua velocidade instantânea ser nula, e estando parado é necessário um intervalo de tempo até que o veículo atinja a velocidade desejável;
- Aceleração e Desaceleração: é a taxa de variação da velocidade dos veículos;
- Tempo de simulação: é o tempo em que os veículos serão monitorados. Quanto maior este tempo, maior será representatividade da rede na simulação;
- Protocolo de roteamento: é o protocolo que os veículos irão utilizar para rotear pacote de dados. É possível que cada veículo em uma VANET utilize protocolos de roteamento diferentes. Portanto, em uma mesma rede VANET pode-se ter veículos utilizando protocolos reativos, ao passo que outros estejam utilizando protocolos proativos.
- Intervalos de tempo (*TimeSchedule*): são intervalos em que são geradas estatísticas da simulação da rede VANET. A medida que este intervalo de tempo diminui, maior é a amostragem de instantes da rede e os resultados da simulação tendem a aproximar-se de uma rede real. No entanto, maior quantidade de instantes da rede deverão ser avaliados

pelos algoritmos Dijkstra e ACO e, conseqüentemente, maior será o esforço computacional.

3.4.2 CENÁRIO 1

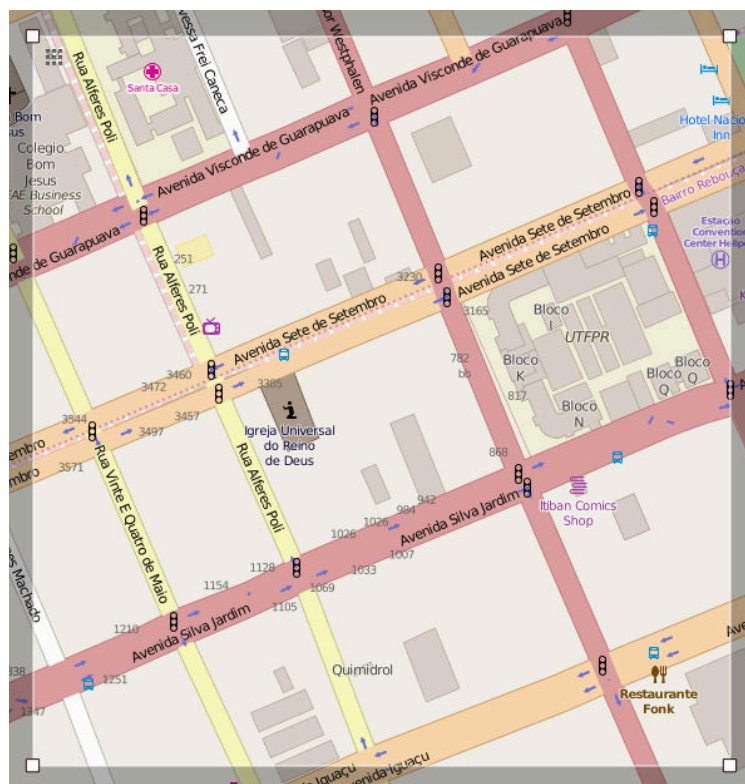
O primeiro cenário proposto contém várias limitações impostas em relação ao cenário de referência. Este cenário teve por objetivo verificar o comportamento da rede VANET com diferentes densidades de veículos.

- Área de simulação: É observado que a maioria dos trabalhos encontrados na literatura recente considera áreas quadradas ou retangulares com tamanhos fixos. Algumas áreas mais comumente usadas são: $600\text{ m} \times 600\text{ m}$; $800\text{ m} \times 800\text{ m}$; $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$; $1500\text{ m} \times 800\text{ m}$ e $1500\text{ m} \times 1500\text{ m}$. Para dar mais realismo à simulação, a área escolhida é uma região central da cidade de Curitiba/PR onde está localizado o câmpus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Foi escolhida uma área quadrada de $600\text{ m} \times 600\text{ m}$ delimitada pelas seguintes coordenadas: Latitude -25.44267 a -25.43704 e Longitude -49.27360 a -49.26763 , conforme mostrado na Figura 16. Esta área possui avenidas horizontais com grande fluxo de veículos e ruas verticais com menor fluxo de veículos.

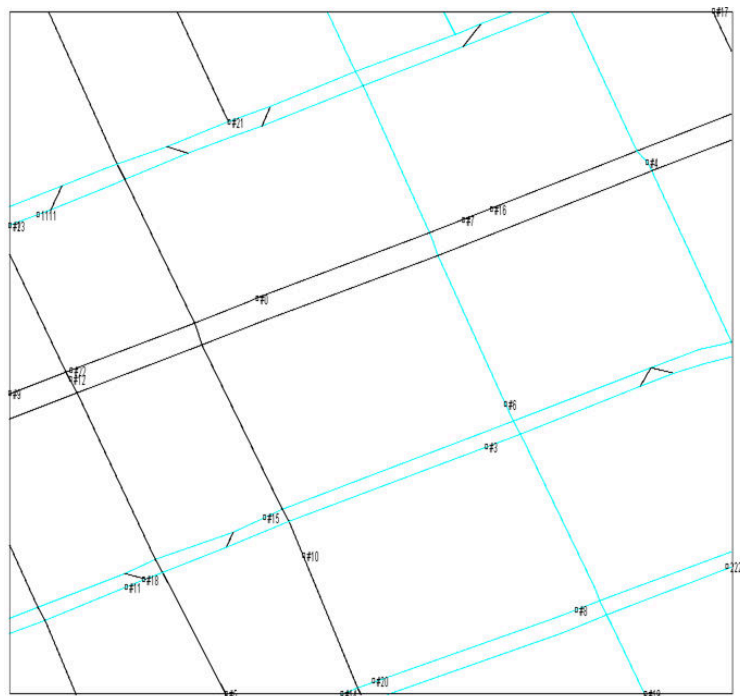
A Figura 16a mostra o mapa OSM com a delimitação da área a ser simulada. A Figura 16b mostra esta mesma área carregada pelo simulador *VanetMobiSim*;

- Mobilidade: O modelo de mobilidade usado foi o IDM-LC. Este modelo gerencia o comportamento dos veículos em interseções (cruzamentos) e em mudanças de vias, o que permite a realização de ultrapassagens. A direção de fluxo dos veículos é definida em função do sentido das vias. O sentido de cada via está contido no mapa OSM e é automaticamente configurado no simulador no momento em que o mapa OSM é importado;
- Propagação dos sinais de rádio: Foi considerada uma rede homogênea em que todos os veículos possuem a capacidade de enviar pacotes de dados de 512 bytes , com uma taxa de transmissão de 16384 bps , ou seja, 4 pacotes de dados por segundo. Cada veículo possui, ainda, uma fila de armazenamento de até 20 pacotes, os pacotes que excederem esta capacidade são descartados. A escolha destes valores se deve ao fato de serem valores comumente usados na literatura recente.

O modelo de propagação usado foi o *Three Log Distance*. A escolha deste modelo foi devido a sua grande utilização na literatura. É possível configurar o *Three Log Distance* para simular uma variedade de ambientes de redes. É possível configurá-lo para simular desde redes rurais até redes urbanas com grande fluxo de veículos e presença de prédios.



(a)



(b)

Figura 16: Área de Simulação 600 m x 600 m próximo ao centro da cidade de Curitiba/PR.

Os parâmetros usados para configurar este cenário foram propostos por Benin et al. (2012) e representam uma rede urbana densa, com presença de vários obstáculos, como prédios e outros veículos.

A potência de transmissão usada por cada veículo foi a potência padrão do NS-3 (16,0206 dB). Para o nível de detecção do sinal também foi mantido o padrão do NS-3 (-96 dB).

- Número de veículos: As simulações foram realizadas considerando o seguinte número de veículos a cada simulação: 25, 50, 100, 200 e 400. Os veículos origem e destino permaneceram fixos em extremidades opostas da área e os demais veículos foram distribuídos em posições aleatórias. Considera-se que o número de veículos permanece constante durante cada simulação, ou seja, os veículos não saem da área simulada e não há veículos novos que entram na área durante a simulação. Se um veículo atingir a borda da área simulada, ele poderá escolher uma das quatro opções a seguir: ficar parado, retornar pela direção que chegou, porém em sentido contrário, virar para a direita ou para esquerda, se houver vias.
- Velocidade dos veículos: Neste cenário os veículos origem e destino permanecem parados durante toda a simulação. Os demais veículos podem se mover ou parar segundo o gerenciamento do modelo de mobilidade usado. Os veículos poderão assumir qualquer valor de velocidade entre 0 Km/h e 60 Km/h com a aceleração e desaceleração padrão do simulador VanetMobiSim ($0,6$ m/s² e $0,9$ m/s², respectivamente).
- Tempo de simulação: Este cenário foi simulado por um tempo total de 200s. Se considerar que um veículo circula durante toda a simulação em velocidade constante e no limite máximo da via (60 Km/h), durante este tempo de 200s o veículo poderá rodar mais de 3300 m. Ou seja, este veículo poderá percorrer a área de um extremo ao outro por quase seis vezes.
- Protocolo de roteamento: Como mostrado na Figura 11, o AODV foi o protocolo mais utilizado na literatura recente para comparações com protocolos baseados em ACO. Portanto, neste trabalho será usado este protocolo para realizar a simulação da rede.
- Intervalos de tempo (*TimeSchedule*): com o objetivo de obter um melhor compromisso entre redução do esforço computacional e obtenção de uma boa representatividade da rede, o intervalo de tempo usado neste trabalho foi 2s. Para os cenários simulados foi observado que neste intervalo de tempo não houve alterações bruscas na VANET. Portanto, com um intervalo de 2s obteve-se uma boa representatividade das redes simuladas.

3.4.3 CENÁRIO 2

O segundo cenário de simulação manteve as mesmas configurações do Cenário 1 com relação a área de simulação, mobilidade e número de veículos. A alteração neste cenário foi a aplicação do modelo de desvanecimento de Nakagami-m em conjunto com o modelo de propagação *Three Log Distance*.

Os parâmetros de configuração do modelo de desvanecimento de Nakagami-m usado neste cenário, foram propostos por Benin et al. (2012). Este parâmetros representam uma rede urbana.

O objetivo deste cenário foi, além de verificar o comportamento da rede com diferentes densidade de veículos, observar o efeito de um modelo de desvanecimento aplicado à comunicação em redes VANETs.

3.4.4 CENÁRIO 3

Este cenário manteve as mesmas configurações do cenário 1 com relação a área de simulação, modelo de propagação e número de veículos. A alteração neste cenário foi a distribuição geográfica dos veículos e a modelagem dos seus fluxos na área de simulação.

A área de simulação contém ruas que normalmente são mais estreitas e possuem mão dupla de circulação, e avenidas que normalmente são mais largas e com um único sentido de circulação. A exemplo dos demais cenários, os veículos origem e destino permaneceram parados em lados opostos da área durante a simulação. Os demais veículos foram distribuídos da seguinte forma: aproximadamente 80% dos veículos circularam pelas avenidas e os outros 20% circularam pelas ruas. O objetivo desta divisão foi atribuir maior dificuldade de conexão à rede VANET. Maior quantidade de veículos circulando pelas avenidas pode gerar congestionamentos e, conseqüentemente, gerar pequenas redes de veículos que não necessariamente estarão interligadas entre si.

3.4.5 CENÁRIO 4

Este cenário foi baseado nas configurações do Cenário 3. Foi aplicado o modelo de desvanecimento de Nakagami-m em conjunto com o modelo de propagação *Three Log Distance*. As configurações do modelo de desvanecimento foram as mesmas usadas no Cenário 2.

O objetivo deste cenário é verificar o comportamento da comunicação na rede descrita

no Cenário 3 quando submetida ao modelo de desvanecimento de Nakagami-m.

3.4.6 CENÁRIO 5

Este último cenário foi baseado no cenário 2, no qual foram alterados os valores de alguns parâmetros de configuração dos modelos de propagação e desvanecimento. Os novos valores foram alterados no intuito de reduzir a severidade dos modelos e permitir que a rede permaneça por mais tempo conectada.

Foi mantido o mesmo modelo de mobilidade usado no cenário 2.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados das simulações realizadas nos cenários descritos no capítulo anterior.

Cada cenário teve sua mobilidade e área configurados e executados no simulador *VanetMobiSim*, gerando assim a disposição inicial de cada veículo e sua localização a cada instante de tempo da simulação. Em seguida foi realizada a simulação de rede no NS-3. Nesta simulação cada veículo da rede foi configurado para realizar *broadcast* de pacotes de dados. Desta forma foi possível encontrar os veículos vizinhos, ou seja, aqueles veículos alcançados por pacotes de dados transmitidos por outro veículo, e o tempo médio de transmissão de pacotes entre eles. Stoffers e Riley (2012) mostraram que o protocolo de roteamento AODV quando aplicado em conjunto com o modelo de propagação *Three Log Distance* resultam em uma boa eficiência da rede (taxa de pacotes recebidos com sucesso). Portanto, este foi o protocolo de roteamento usado por cada veículo para fazer o *broadcast* dos pacotes de dados. Cada veículo foi configurado para transmitir pacotes durante 95% do tempo de simulação e ficar em modo de espera durante 5% do tempo.

No intuito de encontrar a melhor rota entre os veículos origem e destino, o algoritmo Dijkstra foi executado uma vez para cada instante de tempo da simulação (*TimeSchedule*). No ACO a cada execução foram realizadas 300 ciclos para obtenção do caminho entre origem e destino, ou seja, os processos de envio e retorno das formigas, assim como a atualização do feromônio dos caminhos encontrados foram executados 300 vezes. Como se trata de um algoritmo heurístico, o ACO foi repetido 10 vezes para cada quantidade de veículos e calculados média e desvio padrão dos resultados. Os resultados de cada execução são mostrados no Anexo A.

O algoritmo ACO foi executado com os parâmetros e valores mostrados na Tabela 2. Estes valores são encontrados na literatura e foram inicialmente propostos por Dorigo e Stutzle (2004).

A Tabela 3 mostra um resumo das simulações executadas.

Como a área escolhida para as simulações está localizada em uma região próxima ao

Tabela 2: Parâmetros de configuração usados no ACO.

| Parâmetros ACO | |
|-----------------|-----|
| α | 1 |
| β | 2 |
| ρ | 0,5 |
| Número Formigas | 25 |
| Rodadas | 10 |
| Ciclos | 300 |

Tabela 3: Resumo das simulações realizadas.

| Número Veículos | Cenário 1 | | | | | Cenário 2 | | | | |
|-------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 |
| Encontrou caminho | NÃO | NÃO | NÃO | SIM | SIM | NÃO | NÃO | NÃO | SIM | SIM |
| Número Veículos | Cenário 3 | | | | | Cenário 4 | | | | |
| | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 |
| Encontrou caminho | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | SIM | NÃO | NÃO | NÃO | SIM | SIM |

centro da cidade de Curitiba/PR, com presença de prédios e grande concentração de veículos, foram usados os parâmetros propostos por Benin et al. (2012) que simulam a propagação em ambientes urbanos de grande circulação, como os centros das grandes cidades.

A Tabela 4 mostram estes parâmetros que foram usados nos cenários 1, 2, 3, 4 e 5. O cenário 5 foi simulado com parâmetros menos severos, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros dos modelos usados nas simulações.

| Cenários | 1 e 3 | 2 e 4 | 5 |
|--------------------------------|------------------|-------|-----|
| Intervalo Simulação (s) | 2 | 2 | 2 |
| Modelo Propagação | ThreeLogDistance | | |
| Parâmetros Propagação | | | |
| Distancia0 (m) | 1 | 1 | 1 |
| Expoente0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Distancia1 (m) | 75 | 75 | 75 |
| Expoente1 | 5 | 5 | 3,5 |
| Distancia2 (m) | 114 | 114 | 114 |
| Expoente2 | 10 | 10 | 5 |
| Modelo Desvanecimento | Nakagami-m | | |
| m0 | - | 1,5 | 1,5 |
| Distance1 (m) | - | 60 | 60 |
| m1 | - | 0,75 | 1 |
| Distance2 (m) | - | 145 | 145 |
| m2 | - | 0 | 0,5 |

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos com as simulações de cada cenário. São mostrados os custos dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO

em cada instante de tempo da simulação. É mostrado também a porcentagem de quão longe os resultados obtidos pelo algoritmo ACO estão dos resultados obtidos pelo algoritmo de Dijkstra. Observa-se que o custo dos caminhos encontrados pelo ACO foram superiores aos encontrados pelo algoritmo de Dijkstra.

A primeira investigação realizada foi verificar se o ACO executou tempo suficiente para que as formigas convergissem para o caminho de menor custo. A Figura 17 mostra, para o cenário 1 com 200 veículos em um determinado instante da simulação, o custo encontrado por cada formiga em cada um dos ciclos do algoritmo e o custo médio em cada ciclo. Estes custos foram calculados usando a Equação 11 (página 48). Observa-se que inicialmente as formigas encontram caminhos aleatórios, com diferentes custos. Ao se aproximar do ciclo 100, observa que o custo médio dos caminhos tende a convergir para o custo mínimo encontrado pelas formigas. Isto porque a concentração de feromônio é realçada nos melhores caminhos e tende a extinguir nos caminhos com maiores custos, aumentando a probabilidade das formigas escolherem os caminhos de menor custo. Portanto, realizando 300 ciclos em cada rodada, o algoritmo ACO executa tempo suficiente para que as formigas convirjam.

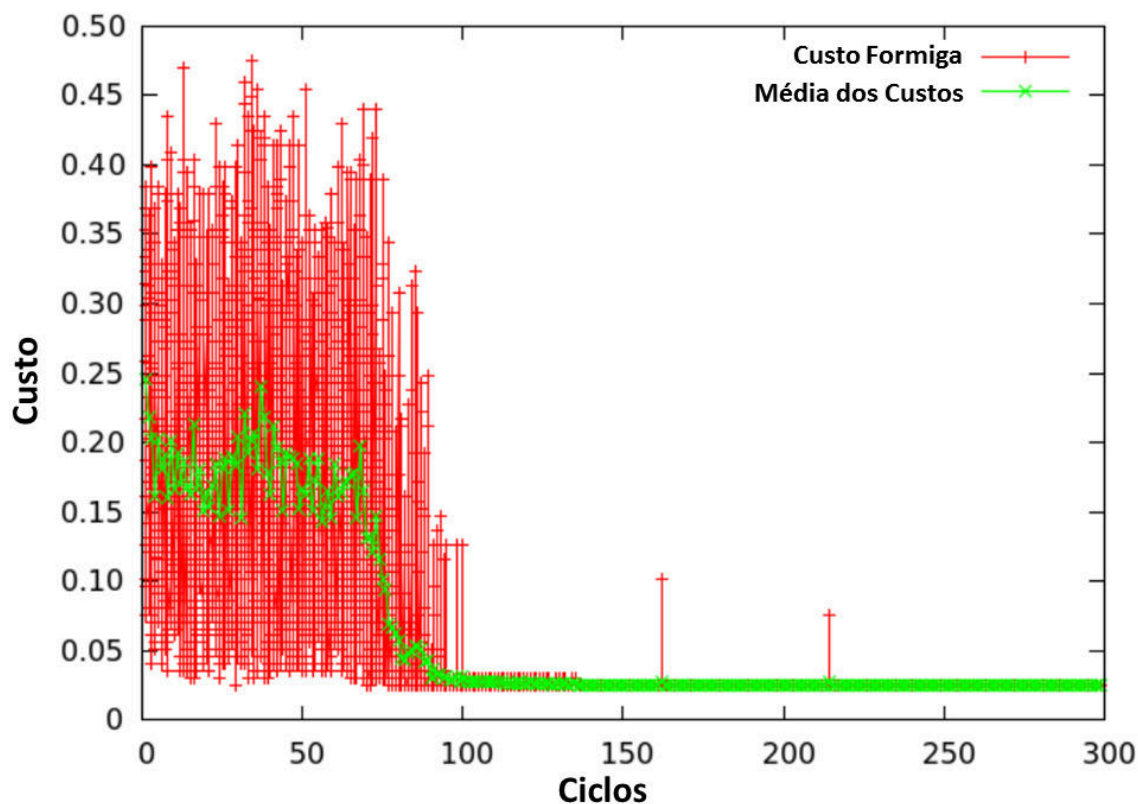


Figura 17: Custo dos caminhos encontrados pelas formigas na execução do ACO em um instante da rede - cenário 1 e rede com 200 veículos.

Tabela 5: Resumo dos resultados das simulações

| Cenário | Número de Veículos | Instante da Simulação | Custo Dijkstra | Custo ACO | ACO vs. Dijkstra (%) |
|---------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------|----------------------|
| 1 | 200 | 104 | 0,041727 | 0,098069 | 235% |
| | | 116 | 0,035344 | 0,063664 | 180% |
| | | 118 | 0,035335 | 0,050468 | 143% |
| | | 120 | 0,035342 | 0,060514 | 171% |
| | | 122 | 0,032765 | 0,060424 | 184% |
| | | 162 | 0,032760 | 0,057949 | 177% |
| | 400 | 22 | 0,020092 | 0,042713 | 213% |
| | | 24 | 0,020082 | 0,046424 | 231% |
| | | 26 | 0,018832 | 0,037694 | 200% |
| | | 28 | 0,020087 | 0,026363 | 131% |
| | | 42 | 0,018835 | 0,028878 | 153% |
| | | 44 | 0,018833 | 0,032642 | 173% |
| | | 50 | 0,026388 | 0,060457 | 229% |
| | | 52 | 0,017609 | 0,036426 | 207% |
| | | 56 | 0,017600 | 0,035157 | 200% |
| | | 58 | 0,026402 | 0,082941 | 314% |
| | | 62 | 0,017614 | 0,037734 | 214% |
| | | 68 | 0,015185 | 0,032649 | 215% |
| | | 98 | 0,016987 | 0,040173 | 236% |
| | | 138 | 0,017566 | 0,035119 | 200% |
| 160 | 0,016372 | 0,060278 | 368% | | |
| 184 | 0,017612 | 0,031374 | 178% | | |
| 186 | 0,020109 | 0,045189 | 225% | | |
| 2 | 200 | 38 | 0,027913 | 0,040567 | 145% |
| | | 74 | 0,049730 | 0,135129 | 272% |
| | | 76 | 0,050575 | 0,103687 | 205% |
| | | 78 | 0,042950 | 0,083279 | 194% |
| | | 104 | 0,045520 | 0,093530 | 205% |
| | | 120 | 0,035416 | 0,055633 | 157% |
| | | 122 | 0,032890 | 0,059185 | 180% |
| | | 160 | 0,033529 | 0,073111 | 218% |
| | | 162 | 0,027760 | 0,052958 | 191% |
| | | 172 | 0,032942 | 0,088278 | 268% |
| | | 174 | 0,030599 | 0,075806 | 248% |
| | | 176 | 0,032868 | 0,063107 | 192% |
| | | 178 | 0,035357 | 0,055556 | 157% |
| | | 180 | 0,030341 | 0,055577 | 183% |
| | 182 | 0,032837 | 0,080768 | 246% | |
| | 400 | 22 | 0,020120 | 0,052787 | 262% |
| | | 24 | 0,018880 | 0,051818 | 274% |
| | | 26 | 0,017831 | 0,037639 | 211% |
| | | 28 | 0,018026 | 0,040157 | 223% |
| | | 38 | 0,017578 | 0,028882 | 164% |
| | | 40 | 0,017574 | 0,038895 | 221% |
| | | 42 | 0,018895 | 0,041504 | 220% |
| | | 50 | 0,017594 | 0,036415 | 207% |
| | | 52 | 0,017636 | 0,049038 | 278% |
| 58 | | 0,016364 | 0,031393 | 192% | |
| 60 | 0,015181 | 0,037818 | 249% | | |
| 62 | 0,016374 | 0,031372 | 192% | | |

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação da página anterior

| Cenário | Número de Veículos | Instante da Simulação | Custo Dijkstra | Custo ACO | ACO vs. Dijkstra (%) |
|---------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------|----------------------|
| 2 | 400 | 64 | 0,026466 | 0,062793 | 237% |
| | | 72 | 0,017656 | 0,030156 | 171% |
| | | 94 | 0,017586 | 0,033030 | 188% |
| | | 96 | 0,017807 | 0,045294 | 254% |
| | | 126 | 0,016335 | 0,055244 | 338% |
| 3 | 400 | 70 | 0,022593 | 0,066810 | 296% |
| | | 78 | 0,018350 | 0,051923 | 283% |
| | | 122 | 0,016370 | 0,045191 | 276% |
| | | 136 | 0,016340 | 0,035145 | 215% |
| | | 144 | 0,023831 | 0,057713 | 242% |
| | | 146 | 0,025125 | 0,048965 | 195% |
| | | 150 | 0,015072 | 0,040174 | 267% |
| | | 152 | 0,016317 | 0,027612 | 169% |
| | | 154 | 0,016325 | 0,031388 | 192% |
| | | 156 | 0,017569 | 0,028863 | 164% |
| | | 158 | 0,016335 | 0,030106 | 184% |
| | | 160 | 0,017603 | 0,030145 | 171% |
| | | 162 | 0,018842 | 0,026384 | 140% |
| | | 164 | 0,017582 | 0,023882 | 136% |
| 4 | 200 | 60 | 0,050490 | 0,159210 | 315% |
| | | 64 | 0,063303 | 0,171774 | 271% |
| | | 72 | 0,034727 | 0,065545 | 189% |
| | 400 | 70 | 0,025144 | 0,059037 | 235% |
| | | 88 | 0,016335 | 0,031448 | 193% |
| | | 90 | 0,018846 | 0,040172 | 213% |
| | | 92 | 0,017587 | 0,037695 | 214% |
| | | 100 | 0,022602 | 0,077155 | 341% |
| | | 102 | 0,017643 | 0,040227 | 228% |
| | | 106 | 0,023926 | 0,075435 | 315% |
| | | 110 | 0,022963 | 0,078817 | 343% |
| | | 112 | 0,013805 | 0,036382 | 264% |
| | | 114 | 0,017575 | 0,035210 | 200% |
| | | 116 | 0,016331 | 0,033881 | 207% |
| | | 146 | 0,017597 | 0,038932 | 221% |
| | | 148 | 0,016320 | 0,035143 | 215% |
| | | 150 | 0,015104 | 0,025147 | 166% |
| | | 152 | 0,017640 | 0,031412 | 178% |
| | | 158 | 0,017581 | 0,031451 | 179% |
| | | 160 | 0,013834 | 0,027650 | 200% |
| 162 | 0,015125 | 0,031398 | 208% | | |
| 5 | 200 | 26 | 0,030335 | 0,050567 | 167% |
| | | 30 | 0,005062 | 0,005062 | 100% |
| | | 32 | 0,017685 | 0,025240 | 143% |
| | | 34 | 0,030486 | 0,050752 | 166% |
| | | 36 | 0,005063 | 0,005063 | 100% |
| | | 40 | 0,027854 | 0,048299 | 173% |
| | | 58 | 0,015247 | 0,017783 | 117% |
| | | 62 | 0,025306 | 0,032907 | 130% |
| | | 64 | 0,017668 | 0,022716 | 129% |
| | | 88 | 0,005049 | 0,005049 | 100% |
| | | 90 | 0,005042 | 0,005042 | 100% |

Continua na próxima página

Tabela 5 – Continuação da página anterior

| Cenário | Número de Veículos | Instante da Simulação | Custo Dijkstra | Custo ACO | ACO vs. Dijkstra (%) |
|---------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------|----------------------|
| 5 | 200 | 96 | 0,015155 | 0,015155 | 100% |
| | | 98 | 0,022721 | 0,022734 | 100% |
| | | 102 | 0,005048 | 0,005048 | 100% |
| | | 106 | 0,005039 | 0,005039 | 100% |
| | | 108 | 0,005041 | 0,005041 | 100% |
| | | 110 | 0,027863 | 0,040488 | 145% |
| | | 114 | 0,020294 | 0,030417 | 150% |
| | | 116 | 0,007583 | 0,007583 | 100% |
| | | 122 | 0,035649 | 0,058002 | 163% |
| | | 132 | 0,005046 | 0,007546 | 150% |
| | | 140 | 0,005057 | 0,007557 | 149% |
| | | 144 | 0,025392 | 0,032978 | 130% |
| | | 148 | 0,020312 | 0,027888 | 137% |
| | | 150 | 0,002525 | 0,002525 | 100% |
| | | 152 | 0,025259 | 0,042959 | 170% |
| | | 156 | 0,005069 | 0,005069 | 100% |
| | | 158 | 0,027750 | 0,063056 | 227% |
| | | 160 | 0,025257 | 0,032814 | 130% |
| | | 162 | 0,035391 | 0,106256 | 300% |
| | | 172 | 0,005056 | 0,005056 | 100% |
| 174 | 0,005309 | 0,005309 | 100% | | |
| 190 | 0,056033 | 0,118396 | 211% | | |
| 198 | 0,007567 | 0,007567 | 100% | | |
| 200 | 0,005053 | 0,005053 | 100% | | |

O primeiro cenário foi simulado usando somente o modelo de propagação *three log distance* sem a presença do modelo de desvanecimento do sinal. Esta simulação teve por objetivo verificar a influência da densidade de veículos na conexão de redes VANET. Yousefi et al. (2008) e Panichpapiboon e Pattara-atikom (2008) mostraram que a conectividade de uma rede é diretamente proporcional à densidade desta rede ($veiculos/m^2$), o que é constatado na simulação deste primeiro cenário. Mantendo-se a área de simulação constante e alterando-se o número de veículos, observou-se que nas simulações realizadas com 25, 50 e 100 veículos não foram encontrados caminhos entre os veículos origem e destino. Isto porque a rede estava constituída por vários *clusters* não interconectados, conforme mostrado na Figura 18, que representa a rede com 50 veículos em um instante da simulação.

Com aumento da quantidade de veículos na área, observou-se uma melhor conexão da rede, pois nas redes com 200 e 400 veículos foi possível encontrar caminho entre os veículos origem e destino. A Figura 19 mostra um exemplo do grafo da rede com 200 veículos em um instante da simulação.

No entanto, analisando-se a Figura 19 observa-se que o alcance de comunicação de cada veículo está bastante reduzido. Isto se deve aos parâmetros usados na configuração do modelo de propagação e do modelo de desvanecimento. Observa-se que os sinais transmiti-

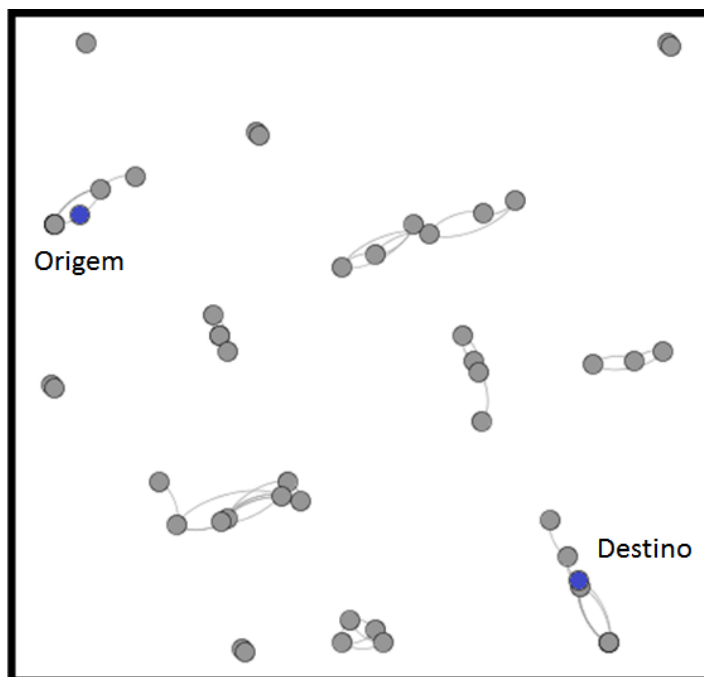


Figura 18: Topologia da Rede com 50 veículos.

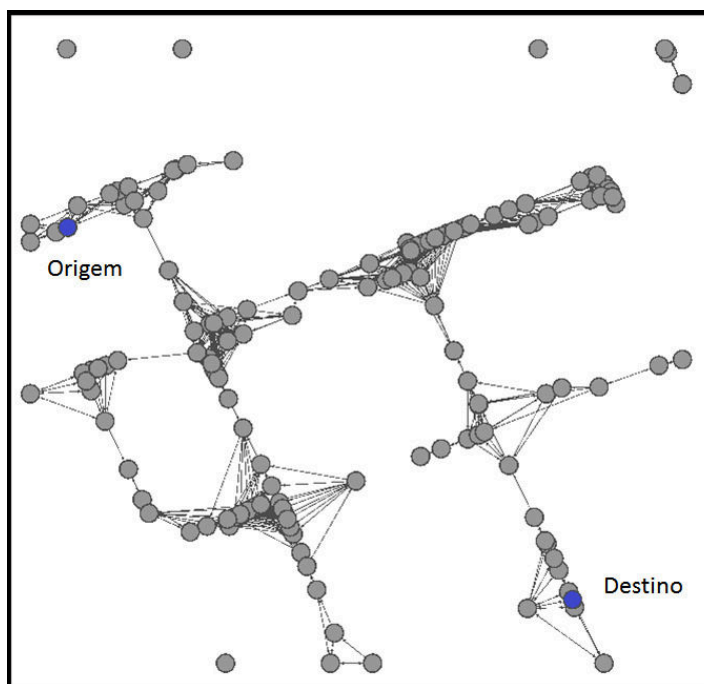


Figura 19: Topologia da Rede com 200 veículos.

dos estão sofrendo influências de obstáculos de comunicação, como os prédios, árvores ou até mesmo outros veículos.

A Figura 20 mostra os custos do caminho entre veículos origem e destino encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO para a rede com 200 veículos, assim como a média e desvio padrão destes custos. O valor do ACO plotado no gráfico representa o menor valor encontrado dentre todas as rodadas. A média e o desvio padrão apresentados no gráfico foram calculados a partir das 10 rodadas em que o ACO foi executado. Todas as simulações foram realizadas entre os instantes de tempo $T = 0s$ e $T = 200s$. Os custos encontrados pelo algoritmo de Dijkstra em cada instante da simulação, refere-se aos custos dos melhores caminhos na rede, ou seja, refere-se aos custos dos caminhos que apresentam o melhor compromisso entre a minimização do número de saltos e a minimização do tempo de transmissão dos pacotes de dados. É observado ainda que o algoritmo ACO encontrou caminhos com custos superiores aos encontrados pelo Dijkstra, conforme mostrado na Tabela 5. A diferença entre estes custos se deve principalmente ao fato do ACO ter escolhido caminhos com maiores números de saltos. Pela Figura 20 observa-se que na maioria dos instantes da simulação não foram encontrados caminhos. Obteve-se caminhos em apenas seis instantes da simulação. Isto se deve ao fato da rede não estar interconectada em grande parte do tempo da simulação, devido aos parâmetros de configuração usados. Este parâmetros usados na configuração dos modelos de propagação e desvanecimento dão maior realismo a simulação, no entanto são bastante severos para a conexão da rede. Observa-se várias instâncias sem nenhuma conectividade.

A Figura 21 mostra o espaço objetivo do cenário 1 com 200 veículos no instante de simulação $T = 104s$. Nesta figura é representado o custo encontrado pelo algoritmo Dijkstra e o custo encontrado por cada uma das 10 rodadas em que o algoritmo ACO foi executado. Observa-se que o menor valor encontrado pelo algoritmo ACO é pertencente ao fronte de Pareto e mostra o melhor compromisso entre menor número de saltos e menor tempo médio de transmissão dos pacotes de dados.

No intuito de avaliar a influência dos parâmetros do algoritmo ACO nas simulações, realizou-se a simulação do cenário 1 alterando o número de formigas usadas para 100. A Figura 22 mostra o resultado desta simulação.

Observa-se que houve uma redução no custo dos caminhos encontrado pelo algoritmo ACO quando aumentou-se o número de formigas. Este resultado corrobora com o fato de que alterações dos parâmetros do algoritmo ACO podem melhorar os resultados.

A Figura 23 mostra o resultado da simulação do cenário 1 com 400 veículos.

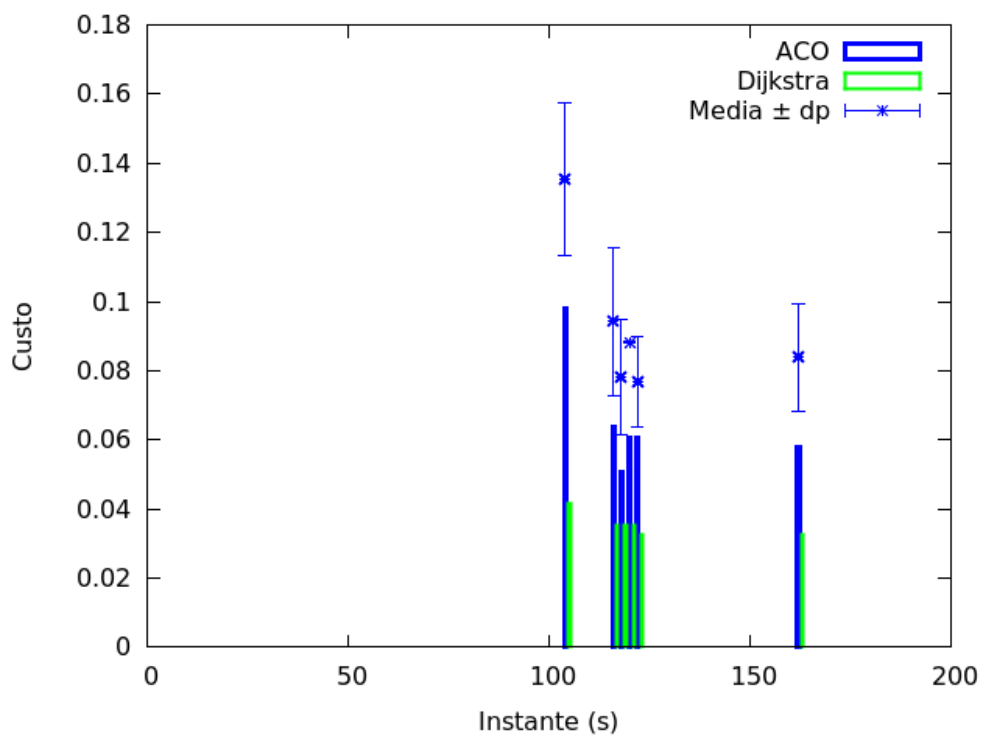


Figura 20: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 1 e rede com 200 veículos.

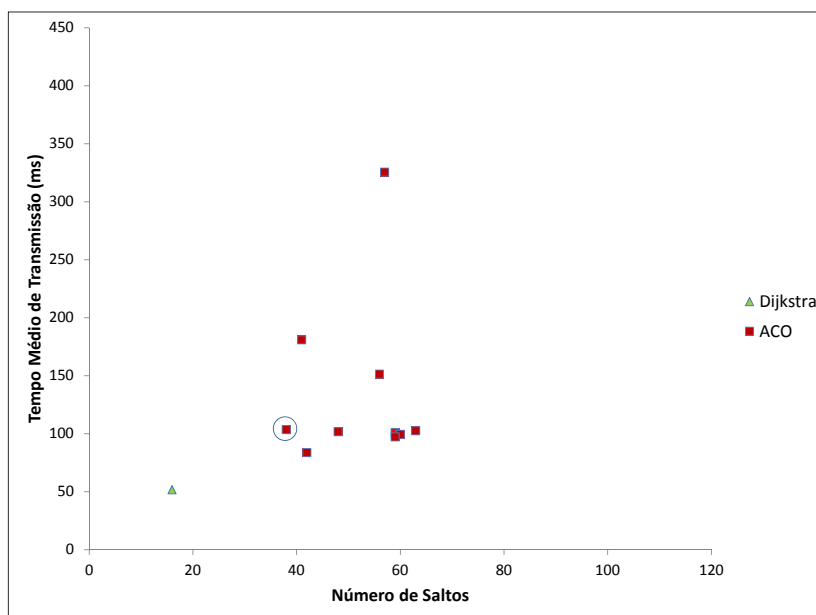


Figura 21: Espaço objetivo do cenário 1 e rede com 200 veículos - Instante $T = 104s$.

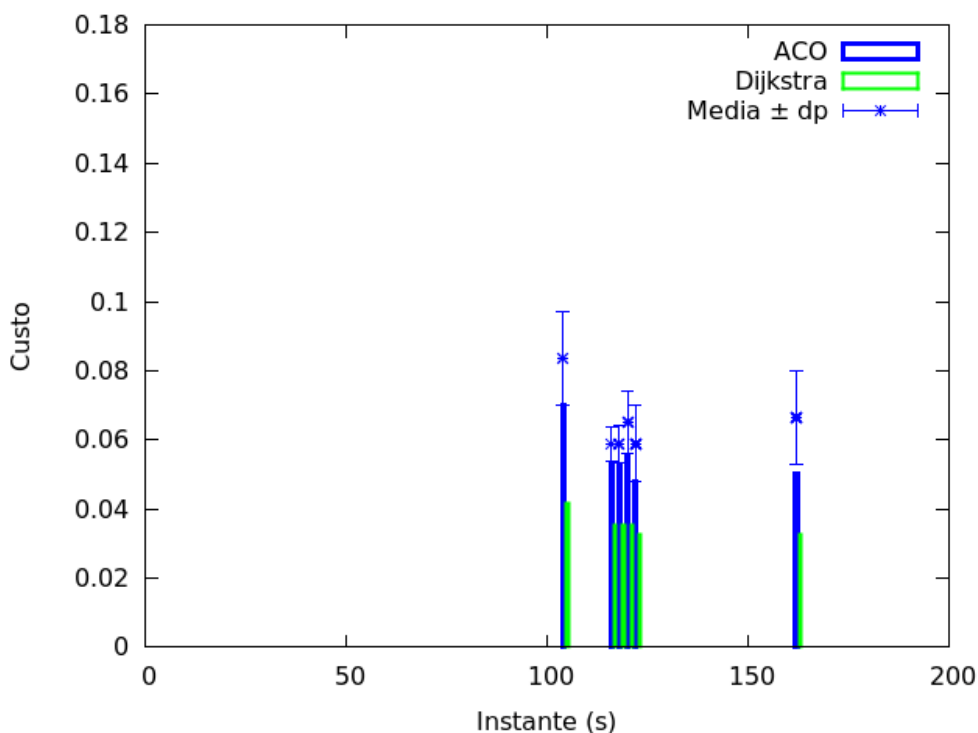


Figura 22: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 1 e rede com 200 veículos (100 formigas).

Ao comparar a Figura 23 com a Figura 20 observa-se que ao aumentar a densidade de veículos na rede, o custo médio dos caminhos encontrados pelos algoritmos reduziram. Isto se deve ao fato de que aumentando o número de veículos na rede, tende a aumentar o número de conexões entre veículos, aumentando assim a quantidade de caminhos possíveis. Aumentando o número de caminhos a rede tende a ficar menos congestionada, o que faz com que o tempo médio de envio de mensagens seja reduzido, reduzindo também os custos dos caminhos.

O cenário 2 foi simulado usando, além das configurações já descritas no cenário anterior, o modelo de Nakagami-m para simulação do desvanecimento do sinal.

A Figura 24 mostra os custos do caminho entre origem e destino encontrados pelos algoritmos neste cenário com a rede composta por 200 veículos. Observa-se que ao usar este modelo de desvanecimento, houve uma melhora na comunicação entre os veículos. A rede VANET permaneceu por mais tempo conectada, pois foi possível encontrar caminho entre origem e destino em instantes da simulação em que o cenário 1 não conseguiu, por exemplo, no instante $T = 40s$.

Stoffers e Riley (2012) mostraram que, ao combinar um modelo de propagação determinístico tal como *three log distance* com modelos de desvanecimento, a transmissão de

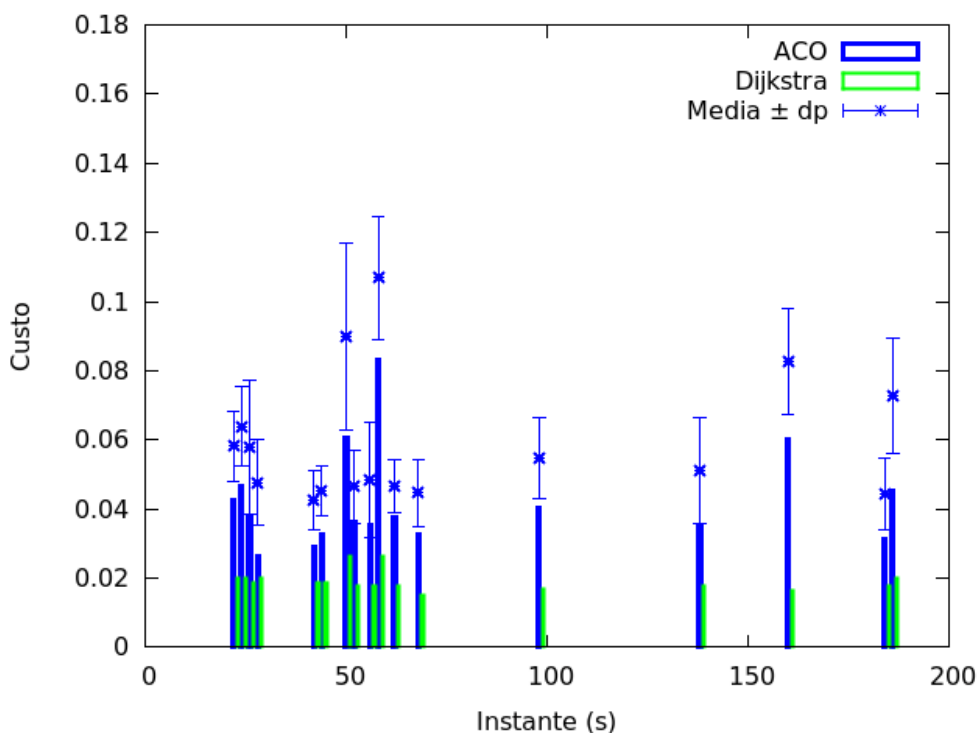


Figura 23: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 1 e rede com 400 veículos.

pacotes de dados é beneficiada por esta redução na potência, pois reduzindo a potência reduz também a interferência entre os sinais e, conseqüentemente, reduz a perda de pacotes. Como no presente trabalho a informação de vizinhança entre os veículos é obtida através da transmissão de pacotes de dados entre eles, observa-se uma maior quantidade de instantes da simulação em que há caminho entre os veículos origem e destino nos cenários em que é aplicado o modelo de desvanecimento.

A Figura 25 mostra o espaço objetivo do cenário 2 com 200 veículos no instante de simulação $T = 38s$. Nesta figura é representado o custo encontrado pelo algoritmo Dijkstra e o custo encontrado por cada uma das 10 rodadas em que o algoritmo ACO foi executado. Observa-se que o menor valor encontrado pelo algoritmo ACO é pertencente ao fronte de Pareto e mostra o melhor compromisso entre menor número de saltos e menor tempo médio de transmissão dos pacotes de dados.

Na simulação do cenário 3 manteve-se as configurações do modelo de propagação usado no cenário 1 e alterou-se somente a distribuição dos veículos e o fluxo de mobilidade.

A exemplo da discussão realizada sobre o cenário 1, observa-se a importância da densidade de veículos na comunicação em redes VANET, pois aumentando-se a densidade de

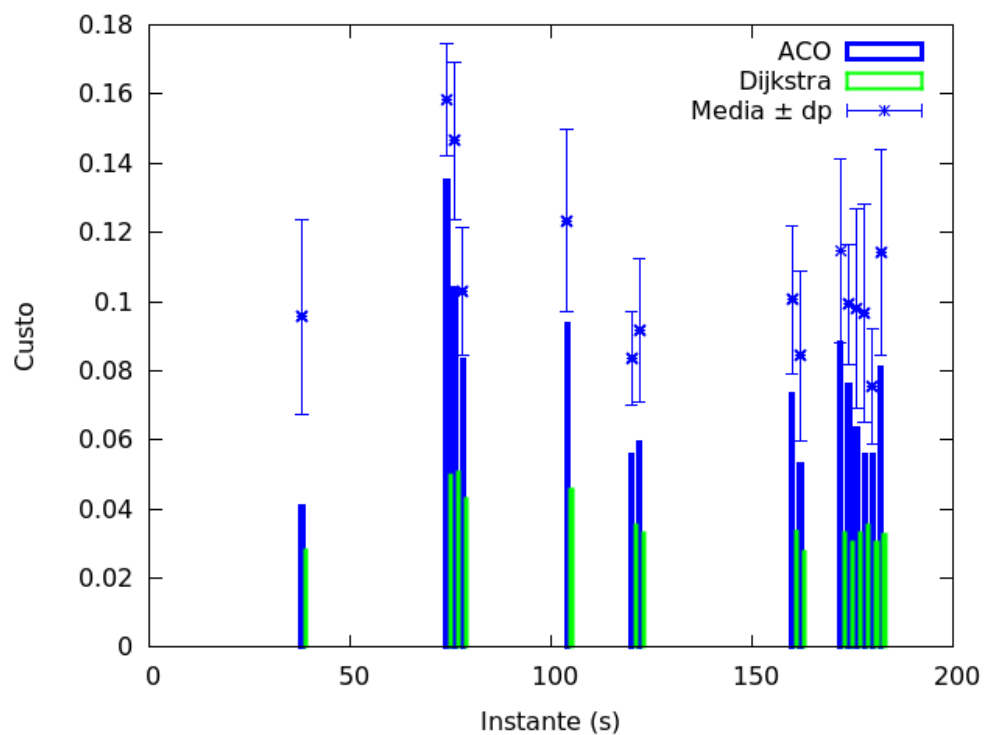


Figura 24: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 2 e rede com 200 veículos.

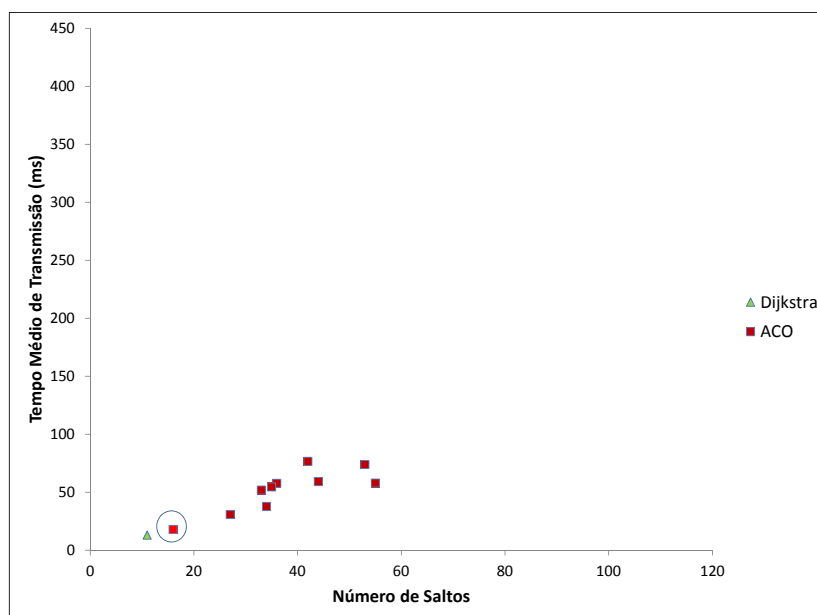


Figura 25: Espaço objetivo do cenário 2 e rede com 200 veículos - Instante $T = 38s$.

veículos na rede, aumentou-se também a conectividade da mesma, propiciando encontrar caminhos entre origem e destino.

Observa-se na Tabela 3 que, diferentemente do cenário 1, em que houve caminho para a rede com 200 e 400 veículos, no cenário 3 obteve-se caminho somente para a simulação com 400 veículos. Observou-se que privilegiando o fluxo de veículos nas avenidas da área simulada e reduzindo-se o número de veículos que trafegam pelas ruas, houve menor conectividade da rede, tornando-se a comunicação entre os veículos mais difícil.

A Figura 26 mostra os custos do caminho entre origem e destino encontrados pelos algoritmos no cenário 3 com a rede composta por 400 veículos.

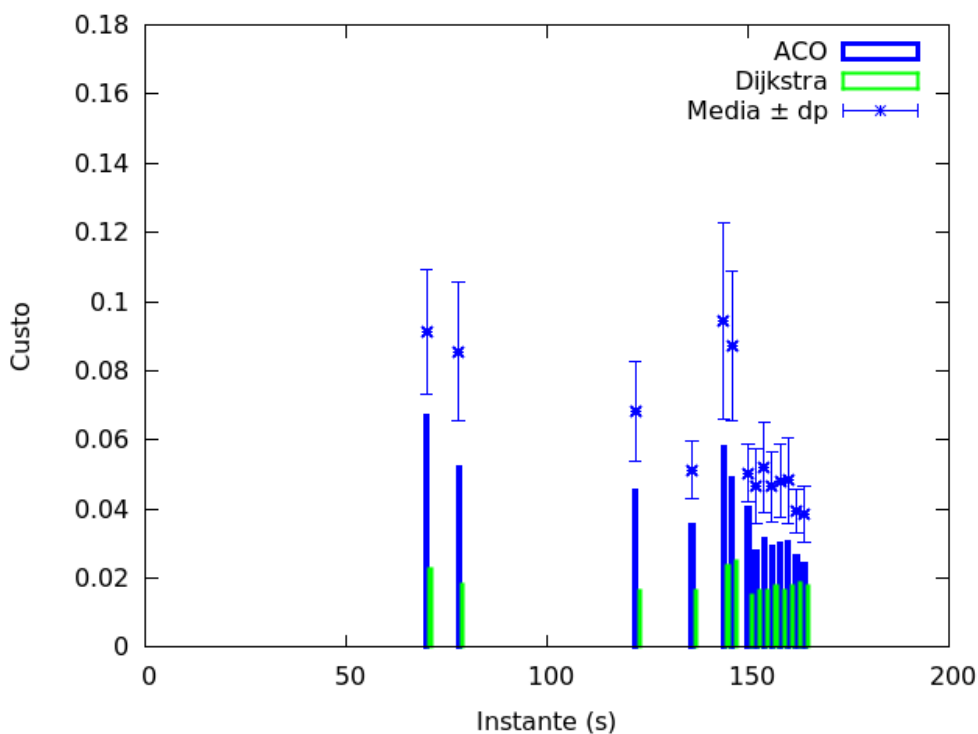


Figura 26: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 3 e rede com 400 veículos.

A Figura 27 mostra o espaço objetivo do cenário 3 com 400 veículos no instante de simulação $T = 78s$. Nesta figura é representado o custo encontrado pelo algoritmo Dijkstra e o custo encontrado por cada uma das 10 rodadas em que o algoritmo ACO foi executado. Observa-se que o menor valor encontrado pelo algoritmo ACO é pertencente ao fronte de Pareto e mostra o melhor compromisso entre menor número de saltos e menor tempo médio de transmissão dos pacotes de dados.

Para a simulação do cenário 4 usou-se os mesmos parâmetros do cenário 3 acrescentando-

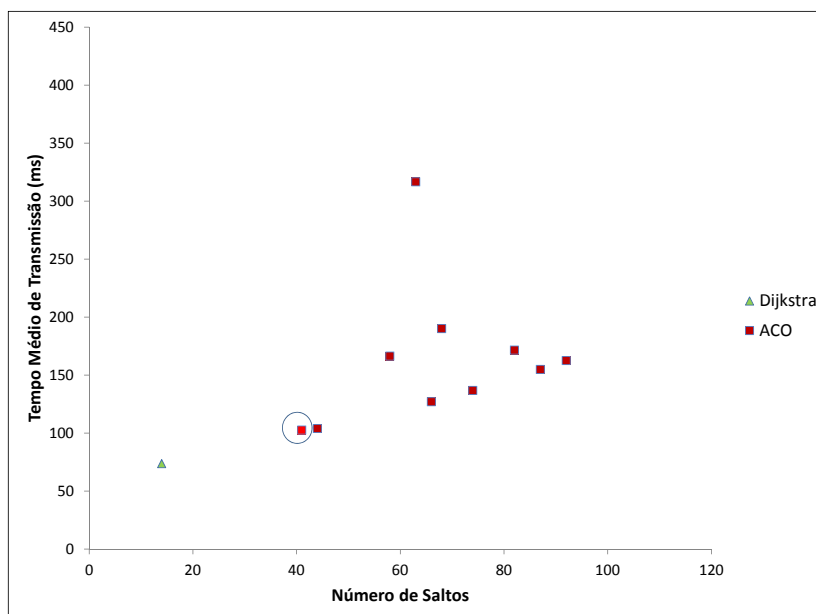


Figura 27: Espaço objetivo do cenário 3 e rede com 400 veículos - Instante $T = 78s$.

se somente o modelo de desvanecimento de Nakagami-m. Comparando os cenários 3 e 4 na Tabela 3 evidencia-se ainda mais o que foi discutido no cenário 2 quanto à melhora de conectividade da rede ao usar o modelo de desvanecimento. Com o uso do modelo de desvanecimento de Nakagami-m neste cenário 4 foi possível encontrar caminho na rede composta por 200 veículos, o que não foi possível no cenário 3 em que foi aplicado somente o modelo de propagação.

A Figura 28 mostra os custos do caminho entre origem e destino encontrados pelos algoritmos neste cenário com a rede composta por 400 veículos.

Observa-se também que neste cenário a rede VANET permaneceu por mais tempo conectada quando comparada ao cenário 3.

A Figura 29 mostra o espaço objetivo do cenário 4 com 400 veículos no instante de simulação $T = 70s$. Nesta figura é representado o custo encontrado pelo algoritmo Dijkstra e o custo encontrado por cada uma das 10 rodadas em que o algoritmo ACO foi executado. Observa-se que o menor valor encontrado pelo algoritmo ACO é pertencente ao fronte de Pareto e mostra o melhor compromisso entre menor número de saltos e menor tempo médio de transmissão dos pacotes de dados.

Os valores dos parâmetros de configuração dos modelos de propagação e desvaneci-

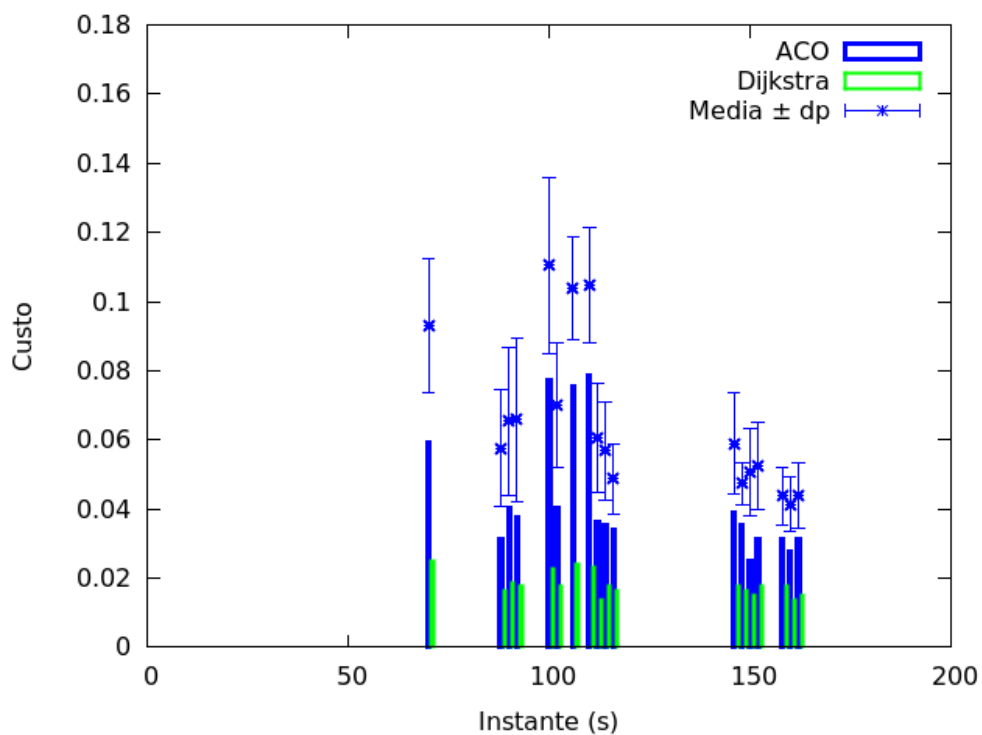


Figura 28: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 4 e rede com 400 veículos.

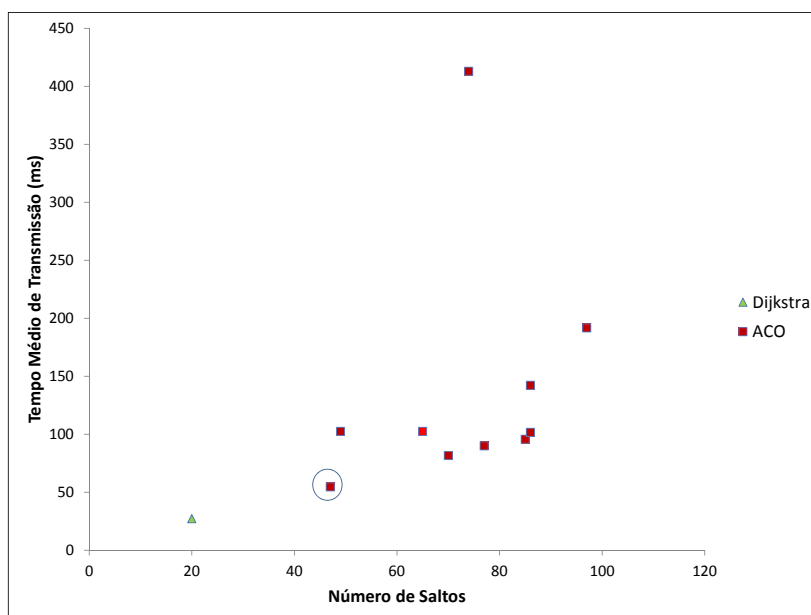


Figura 29: Espaço objetivo do cenário 4 e rede com 400 veículos - Instante $T = 70s$.

mento usados para simular o cenário 5 estão mostrado na Tabela 4. Este cenário foi baseado no cenário 2, no qual foram alterados os valores dos parâmetros de configuração dos modelos de propagação e desvanecimento.

A Figura 30 mostra os resultados da simulação do cenário 5.

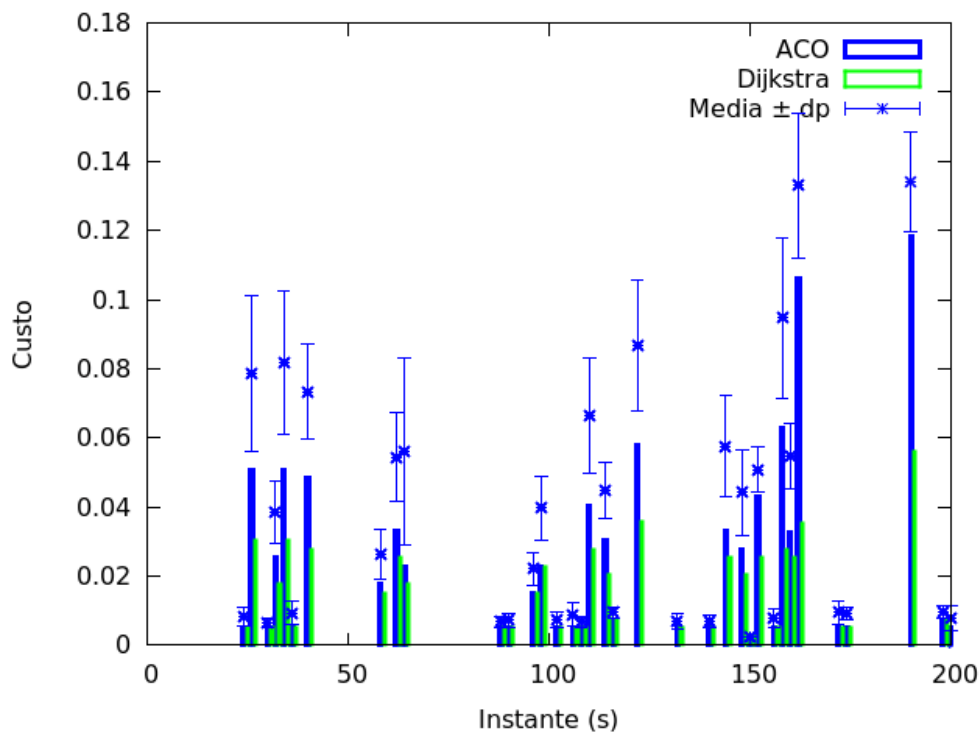


Figura 30: Custo dos caminhos encontrados pelos algoritmos Dijkstra e ACO - cenário 5 e rede com 200 veículos.

A diminuição na severidade dos modelos aumentou a conexão na rede. Portanto, observa-se mais instantes de tempo em que foi possível encontrar caminho entre os veículos origem e destino.

5 CONCLUSÕES

Com o crescimento do número de veículos, principalmente nas grandes cidades, surgem alguns problemas como o aumento dos congestionamentos, o aumento do número de acidentes de trânsito, o aumento de vítimas fatais no trânsito, o aumento da poluição resultante da queima dos combustíveis, dentre outros. Neste contexto as redes VANETs tornaram-se imprescindíveis para o desenvolvimento de sistemas de transportes inteligentes e de seus produtos e serviços associados.

Esta dissertação teve como objetivo criar um *benchmark* com várias instâncias de roteamento em redes VANET que podem ser utilizadas para testes de outros algoritmos. Para criar as instâncias deste *benchmark* foram utilizados simuladores de mobilidade e de rede. O simulador de mobilidade usado (*VanetMobiSim*) possui uma interface amigável ao usuário. Seu tempo de simulação é rápido, sendo possível simular uma rede de 400 veículos em alguns minutos. Apesar de ser um simulador bastante utilizado na comunidade científica, a documentação sobre suas configurações é escassa, limitando-se a um manual com poucas informações. Por outro lado, o simulador de rede usado (NS-3) possui uma vasta documentação e grupos de discussão na internet. O tempo gasto pelo NS-3 nas simulações é consideravelmente alto. Por exemplo, na rede com 400 veículos do cenário 2 foram necessárias aproximadamente 20 horas de simulação.

Os cenários propostos foram configurados no intuito de aproximá-los de redes VANETs do mundo real. No entanto, representar todas as possíveis variáveis de um cenário real pode tornar a simulação impraticável. Portanto, nos cenários propostos foram aplicadas algumas restrições como, por exemplo, limitação da área simulada e limitação do número de veículos. A área de simulação escolhida é uma região localizada próxima ao centro da cidade de Curitiba/PR. Portanto, para a simulação desta rede no NS-3 foram usados os parâmetros de configuração de um dos padrões propostos na literatura para a simulação das transmissões em centros de grandes cidades. Esta configuração considera, por exemplo, a presença de obstáculos como prédios, reflexão e interferências dos sinais transmitidos. Foi observado que tal configuração é bastante severa, pois reduziu consideravelmente o alcance do sinal enviado por cada veículo. Por exemplo, não houve comunicação direta entre veículos que se encontram

na mesma rua ou avenida, separados por uma distância de um quarteirão (aproximadamente 300 m).

Foi constatado que a densidade de veículos em uma VANET influencia a conectividade da rede, pois aumentando-se a densidade de veículos, aumentou-se também a probabilidade de conexão entre eles.

A distribuição geográfica dos veículos na rede VANET influencia diretamente sua conectividade. Observou-se que, privilegiando o fluxo de veículos nas avenidas da área simulada e reduzindo o número de veículos que trafegam pelas ruas, houve menor conectividade da rede.

O nível de potência do sinal transmitido também influencia a eficiência da rede em entregar pacotes. Transmissões com baixa potência tendem alcançar poucos nós devido ao desvanecimento do sinal, ao passo que transmissões com alta potência provocam maior interferência entre os sinais, o aumento do número de colisões de mensagens e, conseqüentemente, o aumento na perda de pacotes. Foi constatado que cenários simulados com modelo de desvanecimento de sinal somado ao modelo de propagação tiraram proveito da redução de potência do sinal transmitido. A redução de potência provocada pelo modelo de desvanecimento reduziu a perda de pacotes e aumentou o número de conexões entre os veículos.

Na execução do algoritmo ACO observou-se que apesar de ter executado 300 ciclos em cada rodada, a convergência do algoritmo tendendo ao custo mínimo do caminho encontrado pelas formigas ocorreu após aproximadamente 100 ciclos. Ao comparar os caminhos encontrados por cada um dos algoritmos usados na simulação, observa-se que o algoritmo ACO encontrou caminhos com custos maiores do que aqueles encontrados pelo algoritmo de Dijkstra em todos os cenários simulados. Portanto, com as configurações que foram utilizadas no presente trabalho o algoritmo ACO apresentou um desempenho ruim. É possível que o algoritmo apresente melhores resultados com diferentes configurações, no entanto, fazer ensaios exaustivos do ACO não foi o foco principal deste trabalho.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A densidade de veículos na rede é importante para a comunicação em VANETs. Sabe-se que o aumento do número de veículos em uma rede aumenta a conexão entre os mesmos mas aumenta a perda de pacotes devido a colisões. É proposto como trabalho futuro criar padrões de densidade para simulações, nos quais haja o compromisso entre a maximização da conexão e minimização da perda de pacotes entre os veículos. É proposto também simulações das redes propostas com diferentes níveis de potência, no intuito de encontrar o melhor compromisso

entre o aumento no alcance do sinal e redução na perda de pacotes.

O presente trabalho usou uma determinada configuração para os modelos de propagação e desvanecimento do sinal transmitido. Propõe-se simular os cenários propostos com outras configurações dos modelos e com outros modelos de propagação. Assim como, comparar o *benchmark* com tráfego real em área representativa.

O algoritmo ACO usado neste trabalho é baseado no AS. Propõe-se como trabalho futuro a comparação do presente *benchmark* com outros algoritmos ACO. Por exemplo, AS com *local search* ou o algoritmo *Max-Min* Dorigo e Stutzle (2004).

REFERÊNCIAS

- ASSIS, L. **Brasil 2050: Trânsito nas grandes cidades**. Acessado em 04/03/2014. Disponível em: <<http://knowledge.othink.com/index.php/brasil-2050/123-brasil-2050-transito-nas-grandes-cidades>>.
- BANZHAF, W. et al. Genetic programming. **IEEE Intelligent Systems and their Applications**, v. 15, n. 3, p. 74–84, May 2000.
- BENIN, J.; NOWATKOWSKI, M.; OWEN, H. Vehicular network simulation propagation loss model parameter standardization in NS-3 and beyond. In: **Proceedings of IEEE Southeastcon**. Piscataway, EUA: IEEE, 2012. p. 1–5.
- CARAMIA, M.; DELL’OLMO, P. **Multi-objective Management in Freight Logistics**. London: Springer-Verlag, 2008.
- CARO, G. D.; DUCATELLE, F.; GAMBARDELLA, L. Swarm intelligence for routing in mobile ad hoc networks. In: **Swarm Intelligence Symposium**. Piscataway, EUA: IEEE, 2005. p. 76–83.
- COHON, J. **Multiobjective Programming and Planning**. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2004. (Dover Books on Computer Science Series).
- COHON, J. L.; CHURCH, R. L.; SHEER, D. P. Generating multiobjective trade-offs: An algorithm for bicriterion problems. **Water Resources Research**, v. 15, n. 5, p. 1001–1010, 1979.
- CORREIA, S.; CELESTINO, J.; CHERKAOUI, O. Mobility-aware ant colony optimization routing for vehicular ad hoc networks. In: **Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. Piscataway, EUA: IEEE, 2011. p. 1125–1130.
- COUTINHO, B. V. **G-NET: Um Protocolo de Roteamento Baseado em Algoritmos Genéticos para Redes Ad Hoc Veiculares**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2015.
- DARUWALA, R. S. **On computing the Pareto optimal solution set in a large scale dynamic network**. Tese (Doutorado) — New York University, 2002.
- DAS, I.; DENNIS, J. E. A closer look at drawbacks of minimizing weighted sums of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 14, n. 1, p. 63–69, ago. 1997.
- DENEUBOURG, J. L. et al. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. **Journal of Insect Behavior**, v. 3, n. 2, p. 159–168, 1990.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, 1959.
- DORIGO, M.; STUTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. Cambridge, EUA: MIT Press, 2004.

- EICHLER, S. Performance evaluation of the IEEE 802.11p WAVE communication standard. In: **66th Vehicular Technology Conference**. Baltimore, EUA: IEEE, 2007. p. 2199–2203.
- FRIIS, H. T. A note on a simple transmission formula. **Proceedings of the IRE**, v. 34, n. 5, p. 254 – 256, 1946.
- GAREY, M.; JOHNSON, D. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness**. 1. ed. New Yourk, EUA: W. H. Freeman, 1979.
- GOSS, S. et al. Self-organized shortcuts in the argentine ant. **The Science of Nature - Naturwissenschaften**, v. 76, p. 579–581, 1989.
- GUPTA, A. K.; SADAWARTI, H.; VERMA, A. K. Review of various routing protocols for manets. **International Journal of Information and Electronics Engineering**, v. 1, n. 40, p. 251–259, 2011.
- GUSTAVO, C.; PEDRO, F.; MANUEL, R. Flowmonitor - a network monitoring framework for the network simulator 3 (NS-3). **Fourth International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools**, ACM, n. 1, p. 1–10, 2009.
- HARRI, J.; FIORE, M. **VanetMobiSim - Vehicular Ad hoc Network mobility extension to the CanuMobiSim framework**. SophiaAntipolis, France, 2006.
- HARRI, J. et al. Vehicular mobility simulation with vanetmobisim. **The Society for Modeling and Simulation International**, San Diego, EUA, v. 87, n. 4, p. 275–300, 2009.
- HASSAN, A. **VANET Simulation**. Dissertação (Mestrado) — School of Information Science, Computer and Electrical Engineering - Halmstad University, 2009.
- IEEE COMPUTER SOCIETY. **Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Amendment 6 Wireless Access in Vehicular Environments**. 2010.
- ISO 17419. **Intelligent transport systems - Cooperative systems - Classification and management of ITS applications in a global context**. Geneva, Switzerland, 2013.
- ISO 17423. **Intelligent transport systems - Cooperative systems - ITS application requirements for automatic selection of communication interfaces**. Geneva, Switzerland, 2013.
- ISO 21217. **Intelligent transport systems - Communications access for land mobiles (CALM) - Architecture**. Geneva, Switzerland, 2014.
- LEGRIEL, J. et al. Approximating the Pareto front of multi-criteria optimization problems. In: **Proceedings of the 16th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 69–83.
- LIANG, Y.; LIU, Y.; ZHANG, L. An improved artificial bee colony (ABC) algorithm for large scale optimization. In: **International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation**. Baltimore, EUA: IEEE, 2013. p. 644–648.
- MARTINS, J.; CORREIA, S.; CELESTINO, J. Ant-dymo: A bio-inspired algorithm for manets. In: **17th International Conference on Telecommunications (ICT)**. Piscataway, EUA: IEEE, 2010. p. 748–754.

- MELANIE, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. Massachusetts, EUA: MIT Press, 1998.
- MICHOUD, R.; OROZCO, A. M.; LLANO, G. Mobile ad-hoc routing protocols survey for the design of VANET applications. **IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium**, p. 1 – 6, 2012.
- MOTIIAN, S.; AGHABABAIE, M.; SOLTANIAN-ZADEH, H. Particle swarm optimization (PSO) of power allocation in cognitive radio systems with interference constraints. In: **International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology**. Baltimore, EUA: IEEE, 2011. p. 558–562.
- OICA. **PRODUCTION STATISTICS FIRST 6 MONTHS**. Acessado em 04/03/2014. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/>>.
- PANICHPAPIBOON, S.; PATTARA-ATIKOM, W. Connectivity requirements for self-organizing traffic information systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 57, n. 6, p. 3333–3340, 2008.
- RANA, H.; THULASIRAMAN, P.; THULASIRAM, R. Mazacornet: Mobility aware zone based ant colony optimization routing for VANET. In: **Congress on Evolutionary Computation**. Washington, EUA: IEEE, 2013. p. 2948–2955.
- SAEED, N.; ABBOD, M.; AL-RAWESHIDY, H. MANET routing protocols taxonomy. In: **International Conference on Future Communication Networks**. Washington, EUA: IEEE, 2012. p. 123–128.
- SILVA, R.; LOPES, H. S.; GODOY JUNIOR, W. A heuristic algorithm based on ant colony optimization for multi-objective routing in vehicle ad hoc networks. In: **BRICS Congress on Computational Intelligence**. Washington, EUA: IEEE, 2013. p. 435–440.
- SILVA, R. et al. Standards for Cooperative Intelligent Transportation Systems: a Proof of Concept. In: International Academy, Research, and Industry Association (IARIA). **The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT)**. Paris, France, 2014.
- SILVA, R. C. da. **Otimização multiobjetivo baseada em colônia de formigas para o roteamento e consumo de energia em redes de sensores sem fio**. Dissertação (Mestrado) — UTFPR, 2008.
- SOMMER, C.; JOERER, S.; DRESSLER, F. On the applicability of two-ray path loss models for vehicular network simulation. In: **Vehicular Networking Conference**. Washington, EUA: IEEE, 2012. p. 64–69.
- SOUZA, A. et al. Stable multicast trees based on ant colony optimization for vehicular ad hoc networks. In: **International Conference on Information Networking**. Washington, EUA: IEEE, 2013. p. 101–106.
- STOFFERS, M.; RILEY, G. Comparing the NS-3 propagation models. In: **20th International Symposium on Modeling Analysis Simulation of Computer and Telecommunication Systems**. Washington, EUA: IEEE, 2012. p. 61–67.
- YOUSEFI, S. et al. Analytical model for connectivity in vehicular ad hoc networks. **Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 57, n. 6, p. 3341–3356, 2008.

ANEXO A – RESULTADOS CENÁRIO 1

Tabela 6: Resultados cenário 1 - 200 veículos

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|----------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 104 | 16 | 51,608800 | 0,041727 | 0 | 57 | 325,532998 | 0,159636 | 0,135374 ± 0,023477 |
| 104 | | | | 1 | 56 | 151,372305 | 0,144474 | |
| 104 | | | | 2 | 48 | 101,611723 | 0,122595 | |
| 104 | | | | 3 | 42 | 83,603975 | 0,107070 | |
| 104 | | | | 4 | 38 | 103,381401 | 0,098069 | |
| 104 | | | | 5 | 59 | 100,848799 | 0,149842 | |
| 104 | | | | 6 | 41 | 180,791311 | 0,110208 | |
| 104 | | | | 7 | 60 | 99,357694 | 0,152282 | |
| 104 | | | | 8 | 59 | 97,131611 | 0,149727 | |
| 104 | | | | 9 | 63 | 102,406440 | 0,159838 | |
| 116 | 14 | 14,786500 | 0,035344 | 0 | 28 | 29,338138 | 0,070683 | 0,10237 ± 0,020532 |
| 116 | | | | 1 | 25 | 44,506187 | 0,063664 | |
| 116 | | | | 2 | 46 | 49,873374 | 0,116161 | |
| 116 | | | | 3 | 42 | 65,206548 | 0,106616 | |
| 116 | | | | 4 | 33 | 151,928262 | 0,090155 | |
| 116 | | | | 5 | 47 | 53,358943 | 0,118743 | |
| 116 | | | | 6 | 46 | 49,873374 | 0,116161 | |
| 116 | | | | 7 | 42 | 65,206548 | 0,106616 | |
| 116 | | | | 8 | 47 | 53,358943 | 0,118743 | |
| 116 | | | | 9 | 46 | 49,873374 | 0,116161 | |
| 118 | 14 | 14,743300 | 0,035335 | 0 | 35 | 37,690341 | 0,088355 | 0,078256 ± 0,017547 |
| 118 | | | | 1 | 20 | 20,561461 | 0,050468 | |
| 118 | | | | 2 | 28 | 29,984463 | 0,070680 | |
| 118 | | | | 3 | 26 | 26,956592 | 0,065613 | |
| 118 | | | | 4 | 26 | 28,243351 | 0,065640 | |
| 118 | | | | 5 | 28 | 29,695189 | 0,070674 | |
| 118 | | | | 6 | 40 | 44,283416 | 0,101004 | |
| 118 | | | | 7 | 31 | 32,583159 | 0,078240 | |
| 118 | | | | 8 | 33 | 34,942806 | 0,083293 | |
| 118 | | | | 9 | 43 | 48,121595 | 0,108591 | |
| 120 | 14 | 17,228700 | 0,035342 | 0 | 36 | 53,913428 | 0,091083 | 0,08822 ± 0,015657 |
| 120 | | | | 1 | 28 | 31,112268 | 0,070622 | |
| 120 | | | | 2 | 33 | 101,242324 | 0,085314 | |
| 120 | | | | 3 | 32 | 34,898838 | 0,080700 | |
| 120 | | | | 4 | 43 | 46,481537 | 0,108433 | |
| 120 | | | | 5 | 41 | 127,237534 | 0,106065 | |
| 120 | 6 | 24 | 25,546065 | 0,060514 | | | | |

Continua na próxima página

Tabela 6 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 120 | | | | 7 | 36 | 39,592037 | 0,090793 | |
| 120 | | | | 8 | 33 | 35,764705 | 0,083218 | |
| 120 | | | | 9 | 40 | 160,941004 | 0,105456 | |
| 122 | | | | 0 | 34 | 61,666190 | 0,085916 | |
| 122 | | | | 1 | 24 | 26,201425 | 0,060427 | |
| 122 | | | | 2 | 33 | 38,927990 | 0,083116 | |
| 122 | | | | 3 | 30 | 34,006779 | 0,075546 | |
| 122 | 13 | 17,360200 | 0,032765 | 4 | 32 | 35,667444 | 0,080576 | 0,076837 ± 0,013988 |
| 122 | | | | 5 | 42 | 48,949060 | 0,105778 | |
| 122 | | | | 6 | 26 | 29,609432 | 0,065474 | |
| 122 | | | | 7 | 24 | 25,911462 | 0,060424 | |
| 122 | | | | 8 | 33 | 40,489262 | 0,083132 | |
| 122 | | | | 9 | 27 | 29,233417 | 0,067978 | |
| 122 | | | | | | | | |
| 162 | | | | 0 | 23 | 26,540074 | 0,057949 | |
| 162 | | | | 1 | 38 | 46,519150 | 0,095776 | |
| 162 | | | | 2 | 33 | 36,204941 | 0,083123 | |
| 162 | | | | 3 | 29 | 33,106397 | 0,073062 | |
| 162 | 13 | 15,508200 | 0,032760 | 4 | 37 | 42,788422 | 0,093224 | 0,083894 ± 0,016501 |
| 162 | | | | 5 | 24 | 26,794732 | 0,060458 | |
| 162 | | | | 6 | 31 | 35,137919 | 0,078098 | |
| 162 | | | | 7 | 43 | 47,469217 | 0,108315 | |
| 162 | | | | 8 | 39 | 42,714849 | 0,098235 | |
| 162 | | | | 9 | 36 | 41,475612 | 0,090702 | |
| 162 | | | | | | | | |

Tabela 7: Resultados cenário 1 - 400 veículos

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 22 | 16 | 19,223200 | 0,0200919 | 0 | 39 | 48,36697 | 0,048981 | 0,058122 ± 0,010853 |
| | | | | 1 | 59 | 127,8008 | 0,074434 | |
| | | | | 2 | 59 | 226,7982 | 0,075495 | |
| | | | | 3 | 49 | 60,99878 | 0,061541 | |
| | | | | 4 | 34 | 44,76517 | 0,042713 | |
| | | | | 5 | 42 | 63,12353 | 0,052803 | |
| | | | | 6 | 46 | 65,81611 | 0,057814 | |
| | | | | 7 | 43 | 54,46547 | 0,054009 | |
| | | | | 8 | 49 | 275,1787 | 0,064138 | |
| | | | | 9 | 39 | 95,07862 | 0,049290 | |
| 24 | 16 | 21,092900 | 0,020082 | 0 | 41 | 54,70277 | 0,051462 | 0,063936 ± 0,012168 |
| | | | | 1 | 39 | 49,41294 | 0,048944 | |
| | | | | 2 | 57 | 91,14059 | 0,071596 | |
| | | | | 3 | 53 | 64,05764 | 0,066505 | |
| | | | | 4 | 37 | 43,26952 | 0,046424 | |
| | | | | 5 | 62 | 70,69907 | 0,077787 | |
| | | | | 6 | 55 | 66,71477 | 0,069015 | |
| | | | | 7 | 65 | 197,7528 | 0,082141 | |
| | | | | 8 | 47 | 56,95761 | 0,058976 | |
| | | | | 9 | 53 | 66,63826 | 0,066512 | |
| 26 | 15 | 16,044700 | 0,0188316 | 0 | 46 | 49,32963 | 0,057751 | 0,057847 ± 0,020419 |
| | | | | 1 | 31 | 33,30372 | 0,038919 | |
| | | | | 2 | 35 | 74,12151 | 0,044176 | |
| | | | | 3 | 30 | 38,65174 | 0,037694 | |
| | | | | 4 | 63 | 268,5342 | 0,081227 | |
| | | | | 5 | 81 | 198,3036 | 0,102480 | |
| | | | | 6 | 37 | 39,41374 | 0,046451 | |
| | | | | 7 | 43 | 46,71606 | 0,053987 | |
| | | | | 8 | 40 | 44,7985 | 0,050227 | |
| | | | | 9 | 52 | 101,0433 | 0,065558 | |
| 28 | 16 | 18,537900 | 0,0200867 | 0 | 31 | 35,55744 | 0,038917 | 0,047622 ± 0,013003 |
| | | | | 1 | 30 | 417,3896 | 0,046455 | |
| | | | | 2 | 31 | 36,34596 | 0,038920 | |
| | | | | 3 | 42 | 47,82702 | 0,052724 | |
| | | | | 4 | 54 | 128,5041 | 0,068189 | |
| | | | | 5 | 43 | 50,89835 | 0,053987 | |
| | | | | 6 | 27 | 31,13853 | 0,033896 | |
| | | | | 7 | 21 | 24,16054 | 0,026363 | |
| | | | | 8 | 48 | 59,5345 | 0,060276 | |
| | | | | 9 | 45 | 52,72482 | 0,056496 | |
| 42 | 15 | 18,857400 | 0,0188351 | 0 | 37 | 60,1242 | 0,046523 | 0,042624 ± 0,009178 |
| | | | | 1 | 40 | 63,878 | 0,050289 | |
| | | | | 2 | 30 | 55,12031 | 0,037757 | |
| | | | | 3 | 23 | 28,34457 | 0,028878 | |
| | | | | 4 | 42 | 48,86485 | 0,052723 | |
| | | | | 5 | 32 | 36,5287 | 0,040167 | |
| | | | | 6 | 46 | 72,55259 | 0,057828 | |
| | | | | 7 | 25 | 157,6934 | 0,032889 | |

Continua na próxima página

Tabela 7 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 8 | 29 | 52,72936 | 0,036495 | |
| | | | | 9 | 34 | 42,04294 | 0,042690 | |
| 44 | 15 | 17,309600 | 0,0188327 | 0 | 37 | 46,07464 | 0,046469 | 0,045134 ± 0,007582 |
| | | | | 1 | 27 | 75,10159 | 0,034207 | |
| | | | | 2 | 45 | 53,90113 | 0,056506 | |
| | | | | 3 | 38 | 45,7244 | 0,047717 | |
| | | | | 4 | 41 | 47,90695 | 0,051479 | |
| | | | | 5 | 26 | 29,56744 | 0,032642 | |
| | | | | 6 | 31 | 34,93609 | 0,038918 | |
| | | | | 7 | 38 | 44,40943 | 0,047712 | |
| | | | | 8 | 39 | 89,97069 | 0,049242 | |
| 50 | 21 | 26,534400 | 0,0263875 | 9 | 37 | 41,02064 | 0,046447 | 0,089819 ± 0,028390 |
| | | | | 0 | 49 | 59,1287 | 0,061556 | |
| | | | | 1 | 70 | 122,1315 | 0,088174 | |
| | | | | 2 | 75 | 98,67349 | 0,094263 | |
| | | | | 3 | 66 | 77,38473 | 0,082901 | |
| | | | | 4 | 83 | 92,94417 | 0,104233 | |
| | | | | 5 | 67 | 123,7103 | 0,084448 | |
| | | | | 6 | 62 | 332,8753 | 0,081432 | |
| | | | | 7 | 47 | 186,2207 | 0,060457 | |
| 52 | 14 | 20,739200 | 0,0176089 | 8 | 63 | 120,7966 | 0,079442 | 0,046392 ± 0,011129 |
| | | | | 9 | 127 | 357,5743 | 0,161289 | |
| | | | | 0 | 36 | 42,36564 | 0,045218 | |
| | | | | 1 | 29 | 34,22845 | 0,036426 | |
| | | | | 2 | 31 | 43,93434 | 0,038979 | |
| | | | | 3 | 30 | 35,77269 | 0,037684 | |
| | | | | 4 | 39 | 44,07746 | 0,048978 | |
| | | | | 5 | 54 | 63,25277 | 0,067826 | |
| | | | | 6 | 30 | 64,53571 | 0,037887 | |
| 56 | 14 | 19,618400 | 0,0176004 | 7 | 36 | 40,44409 | 0,045209 | 0,048475 ± 0,017735 |
| | | | | 8 | 51 | 91,3138 | 0,064255 | |
| | | | | 9 | 33 | 39,83893 | 0,041455 | |
| | | | | 0 | 29 | 32,76284 | 0,036417 | |
| | | | | 1 | 48 | 53,01141 | 0,060271 | |
| | | | | 2 | 37 | 41,28113 | 0,046461 | |
| | | | | 3 | 30 | 37,92185 | 0,037693 | |
| | | | | 4 | 41 | 46,22838 | 0,051486 | |
| | | | | 5 | 74 | 80,73036 | 0,092913 | |
| 58 | 21 | 28,625600 | 0,026402 | 6 | 30 | 35,50069 | 0,037680 | 0,106798 ± 0,018576 |
| | | | | 7 | 40 | 47,45095 | 0,050241 | |
| | | | | 8 | 28 | 30,58271 | 0,035157 | |
| | | | | 9 | 29 | 34,78198 | 0,036427 | |
| | | | | 0 | 90 | 114,0099 | 0,113101 | |
| | | | | 1 | 101 | 159,8428 | 0,127125 | |
| | | | | 2 | 78 | 91,75437 | 0,097983 | |
| 3 | 74 | 79,37968 | 0,092920 | | | | | |
| 4 | 96 | 104,4196 | 0,120552 | | | | | |
| 5 | 67 | 79,98761 | 0,084171 | | | | | |
| 6 | 66 | 83,71473 | 0,082941 | | | | | |

Continua na próxima página

Tabela 7 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 7 | 75 | 82,65816 | 0,094186 | |
| | | | | 8 | 96 | 110,2993 | 0,120581 | |
| | | | | 9 | 107 | 127,8095 | 0,134422 | |
| 62 | 14 | 19,500900 | 0,017614 | 0 | 33 | 37,52876 | 0,041464 | 0,046682 ± 0,008219 |
| | | | | 1 | 32 | 36,03796 | 0,040205 | |
| | | | | 2 | 30 | 40,25805 | 0,037734 | |
| | | | | 3 | 44 | 110,5831 | 0,055852 | |
| | | | | 4 | 38 | 42,02327 | 0,047739 | |
| | | | | 5 | 44 | 52,0503 | 0,055297 | |
| | | | | 6 | 34 | 38,35595 | 0,042718 | |
| | | | | 7 | 31 | 39,79691 | 0,038979 | |
| | | | | 8 | 36 | 43,17986 | 0,045247 | |
| | | | | 9 | 49 | 58,97127 | 0,061587 | |
| 68 | 12 | 31,427200 | 0,0151851 | 0 | 42 | 52,03051 | 0,052748 | 0,044708 ± 0,010225 |
| | | | | 1 | 27 | 32,94081 | 0,033907 | |
| | | | | 2 | 40 | 48,63311 | 0,050232 | |
| | | | | 3 | 28 | 33,33737 | 0,035159 | |
| | | | | 4 | 39 | 46,40738 | 0,048972 | |
| | | | | 5 | 52 | 64,53687 | 0,065307 | |
| | | | | 6 | 26 | 31,16689 | 0,032649 | |
| | | | | 7 | 36 | 42,86313 | 0,045205 | |
| | | | | 8 | 30 | 35,8164 | 0,037671 | |
| | | | | 9 | 36 | 48,49367 | 0,045230 | |
| 98 | 13 | 72,538700 | 0,0169866 | 0 | 33 | 159,2062 | 0,042681 | 0,054883 ± 0,012312 |
| | | | | 1 | 52 | 57,9472 | 0,065276 | |
| | | | | 2 | 59 | 66,67791 | 0,074067 | |
| | | | | 3 | 52 | 100,629 | 0,065504 | |
| | | | | 4 | 36 | 87,67475 | 0,045486 | |
| | | | | 5 | 32 | 37,04008 | 0,040175 | |
| | | | | 6 | 51 | 100,3706 | 0,064256 | |
| | | | | 7 | 32 | 36,41774 | 0,040173 | |
| | | | | 8 | 46 | 149,3387 | 0,058489 | |
| | | | | 9 | 42 | 46,92398 | 0,052724 | |
| 138 | 14 | 18,182100 | 0,0175656 | 0 | 44 | 49,91043 | 0,055190 | 0,051053 ± 0,016024 |
| | | | | 1 | 31 | 35,09166 | 0,038884 | |
| | | | | 2 | 34 | 38,22353 | 0,042646 | |
| | | | | 3 | 61 | 71,76201 | 0,076519 | |
| | | | | 4 | 32 | 37,61284 | 0,040141 | |
| | | | | 5 | 37 | 43,23093 | 0,046413 | |
| | | | | 6 | 28 | 30,79001 | 0,035119 | |
| | | | | 7 | 31 | 34,04969 | 0,038882 | |
| | | | | 8 | 45 | 55,09863 | 0,056453 | |
| | | | | 9 | 64 | 77,55496 | 0,080287 | |
| 160 | 13 | 25,694100 | 0,0163724 | 0 | 67 | 83,35514 | 0,084127 | 0,082536 ± 0,016262 |
| | | | | 1 | 66 | 78,2428 | 0,082856 | |
| | | | | 2 | 52 | 67,2494 | 0,065303 | |
| | | | | 3 | 64 | 80,1388 | 0,080362 | |
| | | | | 4 | 77 | 89,87422 | 0,096660 | |
| | | | | 5 | 83 | 167,4731 | 0,104553 | |

Continua na próxima página

Tabela 7 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 6 | 85 | 119,5484 | 0,106787 | |
| | | | | 7 | 48 | 61,66881 | 0,060278 | |
| | | | | 8 | 52 | 71,44032 | 0,065321 | |
| | | | | 9 | 63 | 80,62266 | 0,079113 | |
| 184 | 14 | 25,088000 | 0,0176121 | 0 | 25 | 29,22703 | 0,031380 | 0,044301 ± 0,010843 |
| | | | | 1 | 25 | 27,41826 | 0,031374 | |
| | | | | 2 | 35 | 38,60221 | 0,043924 | |
| | | | | 3 | 48 | 54,94613 | 0,060246 | |
| | | | | 4 | 26 | 29,49286 | 0,032632 | |
| | | | | 5 | 40 | 42,84013 | 0,050195 | |
| | | | | 6 | 45 | 47,79413 | 0,056468 | |
| | | | | 7 | 34 | 39,32051 | 0,042676 | |
| | | | | 8 | 31 | 35,02422 | 0,038907 | |
| 186 | 16 | 32,255100 | 0,0201088 | 0 | 74 | 96,63652 | 0,092846 | 0,072760 ± 0,017565 |
| | | | | 1 | 65 | 88,15027 | 0,081562 | |
| | | | | 2 | 36 | 55,06283 | 0,045189 | |
| | | | | 3 | 63 | 154,0346 | 0,079287 | |
| | | | | 4 | 54 | 80,58226 | 0,067778 | |
| | | | | 5 | 46 | 65,36221 | 0,057728 | |
| | | | | 6 | 39 | 63,48376 | 0,048966 | |
| | | | | 7 | 66 | 97,55126 | 0,082837 | |
| | | | | 8 | 58 | 367,9377 | 0,074762 | |
| | | | | 9 | 77 | 114,6722 | 0,096646 | |

ANEXO B – RESULTADOS CENÁRIO 2

Tabela 8: Resultados cenário 2 - 200 veículos

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 38 | 11 | 12,884200 | 0,0279129 | 0 | 27 | 30,66356 | 0,068473 | 0,095560 ± 0,029659 |
| | | | | 1 | 44 | 59,10717 | 0,111996 | |
| | | | | 2 | 42 | 76,61296 | 0,108054 | |
| | | | | 3 | 36 | 57,60753 | 0,092124 | |
| | | | | 4 | 33 | 51,7662 | 0,084387 | |
| | | | | 5 | 16 | 17,93039 | 0,040567 | |
| | | | | 6 | 53 | 73,79419 | 0,135033 | |
| | | | | 7 | 34 | 37,69472 | 0,086188 | |
| | | | | 8 | 35 | 54,47557 | 0,089478 | |
| | | | | 9 | 55 | 57,90534 | 0,139302 | |
| 74 | 19 | 54,063100 | 0,0497301 | 0 | 53 | 89,06187 | 0,135129 | 0,156981 ± 0,013669 |
| | | | | 1 | 74 | 111,6343 | 0,188142 | |
| | | | | 2 | 58 | 94,10167 | 0,147733 | |
| | | | | 3 | 61 | 106,8907 | 0,155722 | |
| | | | | 4 | 54 | 315,4108 | 0,158162 | |
| | | | | 5 | 64 | 127,9054 | 0,164147 | |
| | | | | 6 | 61 | 106,8907 | 0,155722 | |
| | | | | 7 | 58 | 94,10167 | 0,147733 | |
| | | | | 8 | 54 | 315,4108 | 0,158162 | |
| | | | | 9 | 62 | 107,6707 | 0,159162 | |
| 76 | 20 | 21,948900 | 0,0505753 | 0 | 54 | 108,5718 | 0,138593 | 0,146491 ± 0,023890 |
| | | | | 1 | 74 | 88,124 | 0,187341 | |
| | | | | 2 | 60 | 95,17271 | 0,152778 | |
| | | | | 3 | 56 | 60,89307 | 0,141594 | |
| | | | | 4 | 57 | 193,8929 | 0,151856 | |
| | | | | 5 | 51 | 55,72843 | 0,128960 | |
| | | | | 6 | 41 | 45,23891 | 0,103687 | |
| | | | | 7 | 55 | 125,9112 | 0,142028 | |
| | | | | 8 | 71 | 77,17869 | 0,179521 | |
| | | | | 9 | 49 | 244,1004 | 0,138558 | |
| 78 | 17 | 20,139100 | 0,0429501 | 0 | 34 | 37,71714 | 0,085842 | 0,102798 ± 0,019429 |
| | | | | 1 | 57 | 85,40401 | 0,144483 | |
| | | | | 2 | 33 | 35,54971 | 0,083294 | |
| | | | | 3 | 41 | 65,99226 | 0,104066 | |
| | | | | 4 | 42 | 103,9449 | 0,108055 | |
| | | | | 5 | 42 | 46,32229 | 0,106034 | |
| | | | | 6 | 43 | 45,30244 | 0,108514 | |
| | | | | 7 | 47 | 49,38946 | 0,118605 | |
| | | | | 8 | 33 | 34,83189 | 0,083279 | |
| | | | | 9 | 34 | 36,10254 | 0,085807 | |
| 104 | 18 | 19,763700 | 0,04552 | 0 | 42 | 243,6753 | 0,123250 | 0,123455 ± 0,027729 |
| | | | | 1 | 47 | 73,36687 | 0,119637 | |
| | | | | 2 | 37 | 39,2978 | 0,093530 | |
| | | | | 3 | 53 | 69,61261 | 0,134402 | |
| | | | | 4 | 44 | 46,7795 | 0,111227 | |
| | | | | 5 | 36 | 108,2881 | 0,094775 | |
| | | | | 6 | 60 | 287,3616 | 0,168420 | |
| | | | | 7 | 40 | 43,23894 | 0,101136 | |

Continua na próxima página

Tabela 8 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 8 | 46 | 48,85013 | 0,116281 | |
| | | | | 9 | 68 | 72,35459 | 0,171897 | |
| 120 | 14 | 15,548200 | 0,0354161 | 0 | 34 | 36,32732 | 0,085967 | 0,083560 ± 0,014469 |
| | | | | 1 | 37 | 93,64054 | 0,096217 | |
| | | | | 2 | 28 | 50,42713 | 0,071609 | |
| | | | | 3 | 36 | 72,86419 | 0,092488 | |
| | | | | 4 | 29 | 30,9948 | 0,073325 | |
| | | | | 5 | 35 | 37,37555 | 0,088495 | |
| | | | | 6 | 40 | 47,09344 | 0,101274 | |
| | | | | 7 | 38 | 61,20472 | 0,096844 | |
| | | | | 8 | 29 | 42,94324 | 0,073747 | |
| | | | | 9 | 22 | 23,73901 | 0,055633 | |
| 122 | 13 | 15,646900 | 0,0328904 | 0 | 32 | 34,93049 | 0,080862 | 0,091588 ± 0,021952 |
| | | | | 1 | 28 | 32,42114 | 0,070805 | |
| | | | | 2 | 52 | 71,9283 | 0,131852 | |
| | | | | 3 | 43 | 85,5667 | 0,110081 | |
| | | | | 4 | 39 | 65,24695 | 0,099302 | |
| | | | | 5 | 36 | 52,6904 | 0,091381 | |
| | | | | 6 | 33 | 36,04633 | 0,083390 | |
| | | | | 7 | 30 | 58,00518 | 0,076722 | |
| | | | | 8 | 23 | 51,82607 | 0,059185 | |
| | | | | 9 | 44 | 80,13579 | 0,112305 | |
| 160 | 13 | 40,608000 | 0,033529 | 0 | 57 | 61,66937 | 0,143677 | 0,100558 ± 0,022688 |
| | | | | 1 | 40 | 242,2897 | 0,110184 | |
| | | | | 2 | 51 | 57,07496 | 0,128582 | |
| | | | | 3 | 30 | 33,88388 | 0,075641 | |
| | | | | 4 | 35 | 38,0222 | 0,088225 | |
| | | | | 5 | 29 | 32,20269 | 0,073111 | |
| | | | | 6 | 44 | 48,73971 | 0,110925 | |
| | | | | 7 | 36 | 62,87223 | 0,091208 | |
| | | | | 8 | 35 | 38,86285 | 0,088238 | |
| | | | | 9 | 38 | 41,60482 | 0,095792 | |
| 162 | 11 | 13,217100 | 0,0277596 | 0 | 32 | 34,56295 | 0,080688 | 0,084231 ± 0,025920 |
| | | | | 1 | 27 | 29,83848 | 0,068091 | |
| | | | | 2 | 26 | 27,72419 | 0,065553 | |
| | | | | 3 | 41 | 47,82443 | 0,103442 | |
| | | | | 4 | 30 | 32,83241 | 0,075652 | |
| | | | | 5 | 57 | 63,11186 | 0,143751 | |
| | | | | 6 | 27 | 30,50236 | 0,068103 | |
| | | | | 7 | 34 | 36,9907 | 0,085735 | |
| | | | | 8 | 21 | 23,06589 | 0,052958 | |
| | | | | 9 | 39 | 41,98788 | 0,098336 | |
| 172 | 13 | 23,497000 | 0,032942 | 0 | 35 | 42,41497 | 0,088278 | 0,132444 ± 0,016539 |
| | | | | 1 | 56 | 72,80723 | 0,141326 | |
| | | | | 2 | 56 | 72,70723 | 0,140325 | |
| | | | | 3 | 56 | 72,70823 | 0,140336 | |
| | | | | 4 | 57 | 72,81824 | 0,144326 | |
| | | | | 5 | 55 | 72,40823 | 0,131328 | |
| | | | | 6 | 55 | 72,53823 | 0,133528 | |

Continua na próxima página

Tabela 8 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 7 | 46 | 71,53823 | 0,125328 | |
| | | | | 8 | 55 | 74,56824 | 0,138338 | |
| | | | | 9 | 56 | 75,52824 | 0,141329 | |
| 174 | 12 | 21,905800 | 0,0305988 | 0 | 52 | 56,51455 | 0,131345 | 0,099140 ± 0,018282 |
| | | | | 1 | 37 | 66,23395 | 0,094294 | |
| | | | | 2 | 50 | 55,27225 | 0,126316 | |
| | | | | 3 | 41 | 47,60722 | 0,103637 | |
| | | | | 4 | 30 | 33,83127 | 0,075806 | |
| | | | | 5 | 34 | 39,42806 | 0,085942 | |
| | | | | 6 | 34 | 38,38355 | 0,085915 | |
| | | | | 7 | 43 | 48,10889 | 0,108646 | |
| | | | | 8 | 34 | 40,51025 | 0,085970 | |
| | | | | 9 | 37 | 43,08085 | 0,093529 | |
| 176 | 13 | 16,248400 | 0,0328676 | 0 | 25 | 26,96749 | 0,063107 | 0,107062 ± 0,030179 |
| | | | | 1 | 31 | 34,5849 | 0,078278 | |
| | | | | 2 | 31 | 34,21185 | 0,078269 | |
| | | | | 3 | 46 | 49,81128 | 0,116121 | |
| | | | | 4 | 56 | 105,2203 | 0,142684 | |
| | | | | 5 | 30 | 52,3885 | 0,076294 | |
| | | | | 6 | 45 | 284,2313 | 0,129920 | |
| | | | | 7 | 46 | 49,81127 | 0,116131 | |
| | | | | 8 | 46 | 284,2313 | 0,126133 | |
| | | | | 9 | 56 | 106,5203 | 0,143686 | |
| 178 | 14 | 15,462500 | 0,0353569 | 0 | 52 | 55,36144 | 0,131278 | 0,096751 ± 0,033243 |
| | | | | 1 | 61 | 63,56851 | 0,153969 | |
| | | | | 2 | 45 | 47,17707 | 0,113590 | |
| | | | | 3 | 28 | 29,80874 | 0,070688 | |
| | | | | 4 | 25 | 26,39542 | 0,063110 | |
| | | | | 5 | 42 | 44,59764 | 0,106030 | |
| | | | | 6 | 47 | 49,65589 | 0,118647 | |
| | | | | 7 | 36 | 38,29382 | 0,090884 | |
| | | | | 8 | 22 | 24,0809 | 0,055556 | |
| | | | | 9 | 25 | 47,31489 | 0,063758 | |
| 180 | 12 | 14,532900 | 0,0303414 | 0 | 25 | 27,4731 | 0,063141 | 0,079977 ± 0,018278 |
| | | | | 1 | 22 | 24,69156 | 0,055577 | |
| | | | | 2 | 28 | 223,9502 | 0,087680 | |
| | | | | 3 | 26 | 28,44019 | 0,065664 | |
| | | | | 4 | 36 | 231,1942 | 0,105357 | |
| | | | | 5 | 29 | 30,89343 | 0,073221 | |
| | | | | 6 | 24 | 28,35528 | 0,060664 | |
| | | | | 7 | 30 | 232,3501 | 0,092894 | |
| | | | | 8 | 31 | 233,3511 | 0,097690 | |
| | | | | 9 | 31 | 233,5514 | 0,097880 | |
| 182 | 13 | 15,908500 | 0,0328371 | 0 | 32 | 36,24353 | 0,080768 | 0,115209 ± 0,028082 |
| | | | | 1 | 49 | 54,79333 | 0,123663 | |
| | | | | 2 | 50 | 54,60102 | 0,126161 | |
| | | | | 3 | 34 | 49,37438 | 0,086066 | |
| | | | | 4 | 69 | 101,4469 | 0,174696 | |
| | | | | 5 | 32 | 37,24442 | 0,080789 | |

Continua na próxima página

Tabela 8 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-------|--------|--------|------------|----------|------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 6 | 46 | 59,44574 | 0,116263 | |
| | | | | 7 | 47 | 188,2897 | 0,124658 | |
| | | | | 8 | 46 | 59,54575 | 0,116367 | |
| | | | | 9 | 47 | 60,54556 | 0,122654 | |

Tabela 9: Resultados cenário 2 - 400 veículos

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 22 | 16 | 20,756500 | 0,0201195 | 0 | 60 | 74,2063 | 0,075424 | 0,079381 ± 0,020266 |
| | | | | 1 | 65 | 243,8014 | 0,083780 | |
| | | | | 2 | 67 | 77,20386 | 0,084189 | |
| | | | | 3 | 42 | 50,40902 | 0,052787 | |
| | | | | 4 | 42 | 336,5106 | 0,059182 | |
| | | | | 5 | 89 | 102,6391 | 0,111834 | |
| | | | | 6 | 51 | 101,5193 | 0,064429 | |
| | | | | 7 | 54 | 61,15141 | 0,067848 | |
| | | | | 8 | 65 | 74,11246 | 0,081671 | |
| | | | | 9 | 84 | 499,4571 | 0,112667 | |
| 24 | 15 | 22,992400 | 0,01888 | 0 | 84 | 99,62643 | 0,105542 | 0,072322 ± 0,016083 |
| | | | | 1 | 59 | 120,054 | 0,074509 | |
| | | | | 2 | 51 | 70,37244 | 0,064139 | |
| | | | | 3 | 60 | 585,3539 | 0,087639 | |
| | | | | 4 | 63 | 208,472 | 0,080560 | |
| | | | | 5 | 48 | 54,49076 | 0,060296 | |
| | | | | 6 | 41 | 87,54214 | 0,051818 | |
| | | | | 7 | 57 | 182,4557 | 0,072794 | |
| | | | | 8 | 56 | 67,40986 | 0,070367 | |
| | | | | 9 | 44 | 88,53412 | 0,055557 | |
| 26 | 14 | 56,857800 | 0,017831 | 0 | 30 | 32,89167 | 0,037639 | 0,067254 ± 0,017048 |
| | | | | 1 | 51 | 58,77866 | 0,063995 | |
| | | | | 2 | 57 | 65,01329 | 0,071521 | |
| | | | | 3 | 49 | 59,31871 | 0,061493 | |
| | | | | 4 | 48 | 54,09369 | 0,060227 | |
| | | | | 5 | 71 | 150,4733 | 0,089371 | |
| | | | | 6 | 40 | 46,28031 | 0,050192 | |
| | | | | 7 | 63 | 199,1176 | 0,079732 | |
| | | | | 8 | 74 | 205,6713 | 0,093446 | |
| | | | | 9 | 49 | 376,4077 | 0,064927 | |
| 28 | 14 | 71,192800 | 0,0180257 | 0 | 51 | 59,54605 | 0,064004 | 0,065137 ± 0,017234 |
| | | | | 1 | 64 | 75,06124 | 0,080319 | |
| | | | | 2 | 52 | 61,06672 | 0,065260 | |
| | | | | 3 | 51 | 55,26683 | 0,063991 | |
| | | | | 4 | 63 | 72,71787 | 0,079061 | |
| | | | | 5 | 79 | 96,36989 | 0,099156 | |
| | | | | 6 | 46 | 68,20933 | 0,057780 | |
| | | | | 7 | 41 | 48,27236 | 0,051455 | |
| | | | | 8 | 32 | 36,7058 | 0,040157 | |

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 9 | 40 | 44,36603 | 0,050192 | |
| 38 | 14 | 18,204600 | 0,0175778 | 0 | 28 | 42,54404 | 0,035180 | 0,047355 ± 0,013126 |
| | | | | 1 | 60 | 72,18013 | 0,075312 | |
| | | | | 2 | 48 | 63,51947 | 0,060271 | |
| | | | | 3 | 37 | 42,04875 | 0,046434 | |
| | | | | 4 | 30 | 83,95434 | 0,037930 | |
| | | | | 5 | 35 | 45,3285 | 0,043944 | |
| | | | | 6 | 40 | 47,95744 | 0,050208 | |
| | | | | 7 | 39 | 44,62009 | 0,048945 | |
| | | | | 8 | 37 | 43,56521 | 0,046439 | |
| | | | | 9 | 23 | 31,0608 | 0,028882 | |
| 40 | 14 | 21,423800 | 0,0175739 | 0 | 51 | 61,98767 | 0,063979 | 0,059993 ± 0,025107 |
| | | | | 1 | 45 | 63,00974 | 0,056472 | |
| | | | | 2 | 38 | 61,48686 | 0,047710 | |
| | | | | 3 | 102 | 126,709 | 0,127964 | |
| | | | | 4 | 45 | 69,72455 | 0,056490 | |
| | | | | 5 | 41 | 69,21434 | 0,051486 | |
| | | | | 6 | 37 | 46,04878 | 0,046418 | |
| | | | | 7 | 50 | 100,178 | 0,062841 | |
| | | | | 8 | 38 | 46,57686 | 0,047671 | |
| | | | | 9 | 31 | 40,05695 | 0,038895 | |
| 42 | 15 | 25,342400 | 0,0188946 | 0 | 80 | 172,0862 | 0,101093 | 0,060704 ± 0,017832 |
| | | | | 1 | 51 | 62,3059 | 0,064083 | |
| | | | | 2 | 45 | 110,3288 | 0,057006 | |
| | | | | 3 | 60 | 77,61062 | 0,075417 | |
| | | | | 4 | 33 | 46,69859 | 0,041504 | |
| | | | | 5 | 38 | 49,40757 | 0,047766 | |
| | | | | 6 | 53 | 97,33428 | 0,066823 | |
| | | | | 7 | 48 | 60,83891 | 0,060326 | |
| | | | | 8 | 39 | 50,39684 | 0,049021 | |
| | | | | 9 | 35 | 46,66738 | 0,044002 | |
| 50 | 14 | 19,713000 | 0,017594 | 0 | 36 | 43,21523 | 0,045207 | 0,058792 ± 0,019179 |
| | | | | 1 | 43 | 52,94366 | 0,054002 | |
| | | | | 2 | 40 | 102,4698 | 0,050598 | |
| | | | | 3 | 42 | 49,04135 | 0,052735 | |
| | | | | 4 | 72 | 619,2345 | 0,099392 | |
| | | | | 5 | 29 | 34,59454 | 0,036415 | |
| | | | | 6 | 56 | 149,3669 | 0,070892 | |
| | | | | 7 | 42 | 48,00446 | 0,052731 | |
| | | | | 8 | 64 | 139,6513 | 0,080750 | |
| | | | | 9 | 36 | 42,37504 | 0,045203 | |
| 52 | 14 | 21,453100 | 0,0176364 | 0 | 62 | 76,05899 | 0,077957 | 0,061386 ± 0,009354 |
| | | | | 1 | 41 | 51,33536 | 0,051560 | |
| | | | | 2 | 40 | 47,42944 | 0,050284 | |
| | | | | 3 | 48 | 57,81094 | 0,060347 | |
| | | | | 4 | 47 | 57,97388 | 0,059099 | |
| | | | | 5 | 53 | 65,87661 | 0,066647 | |
| | | | | 6 | 39 | 47,92313 | 0,049038 | |
| | | | | 7 | 55 | 78,27146 | 0,069236 | |

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 8 | 49 | 59,55551 | 0,061608 | |
| | | | | 9 | 54 | 89,82332 | 0,068090 | |
| 58 | 13 | 21,152000 | 0,0163643 | 0 | 60 | 71,59314 | 0,075371 | 0,057687 ± 0,016518 |
| | | | | 1 | 44 | 53,64807 | 0,055278 | |
| | | | | 2 | 34 | 37,36288 | 0,042694 | |
| | | | | 3 | 52 | 65,23768 | 0,065338 | |
| | | | | 4 | 51 | 116,7073 | 0,064480 | |
| | | | | 5 | 40 | 52,92501 | 0,050275 | |
| | | | | 6 | 68 | 351,6068 | 0,089024 | |
| | | | | 7 | 42 | 47,11685 | 0,052745 | |
| | | | | 8 | 25 | 27,57194 | 0,031393 | |
| | | | | 9 | 40 | 52,59022 | 0,050273 | |
| 60 | 12 | 31,482300 | 0,0151806 | 0 | 69 | 170,5755 | 0,087196 | 0,072681 ± 0,019295 |
| | | | | 1 | 52 | 65,77291 | 0,065307 | |
| | | | | 2 | 57 | 74,34946 | 0,071597 | |
| | | | | 3 | 87 | 111,8635 | 0,109272 | |
| | | | | 4 | 53 | 80,71096 | 0,066629 | |
| | | | | 5 | 57 | 89,07832 | 0,071670 | |
| | | | | 6 | 30 | 62,26125 | 0,037818 | |
| | | | | 7 | 72 | 91,97453 | 0,090430 | |
| | | | | 8 | 49 | 71,76862 | 0,061586 | |
| | | | | 9 | 52 | 64,2729 | 0,065301 | |
| 62 | 13 | 29,311800 | 0,0163738 | 0 | 51 | 62,15067 | 0,064005 | 0,054303 ± 0,019074 |
| | | | | 1 | 37 | 47,79267 | 0,046444 | |
| | | | | 2 | 30 | 39,14965 | 0,037658 | |
| | | | | 3 | 36 | 88,27234 | 0,045385 | |
| | | | | 4 | 62 | 351,3098 | 0,080165 | |
| | | | | 5 | 73 | 93,85207 | 0,091631 | |
| | | | | 6 | 25 | 29,51394 | 0,031372 | |
| | | | | 7 | 42 | 140,1573 | 0,053218 | |
| | | | | 8 | 33 | 40,14132 | 0,041415 | |
| | | | | 9 | 41 | 108,4718 | 0,051739 | |
| 64 | 21 | 38,450800 | 0,0264655 | 0 | 50 | 56,60368 | 0,062793 | 0,112876 ± 0,035339 |
| | | | | 1 | 86 | 159,9263 | 0,108402 | |
| | | | | 2 | 109 | 326,1532 | 0,138657 | |
| | | | | 3 | 142 | 303,0431 | 0,179319 | |
| | | | | 4 | 125 | 146,5073 | 0,157007 | |
| | | | | 5 | 88 | 103,2775 | 0,110534 | |
| | | | | 6 | 70 | 83,55691 | 0,087932 | |
| | | | | 7 | 78 | 89,05004 | 0,097961 | |
| | | | | 8 | 78 | 111,6567 | 0,098085 | |
| | | | | 9 | 70 | 106,8887 | 0,088067 | |
| 72 | 14 | 24,411200 | 0,0176557 | 0 | 36 | 49,2593 | 0,045290 | 0,052931 ± 0,020225 |
| | | | | 1 | 43 | 49,09405 | 0,054032 | |
| | | | | 2 | 35 | 39,96099 | 0,043980 | |
| | | | | 3 | 68 | 81,31732 | 0,085469 | |
| | | | | 4 | 24 | 27,1876 | 0,030156 | |
| | | | | 5 | 34 | 41,48731 | 0,042740 | |
| | | | | 6 | 33 | 37,55155 | 0,041466 | |

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 7 | 74 | 109,561 | 0,093159 | |
| | | | | 8 | 34 | 43,99005 | 0,042756 | |
| | | | | 9 | 40 | 45,96217 | 0,050264 | |
| 94 | 14 | 19,152000 | 0,0175859 | 0 | 48 | 56,54399 | 0,060257 | 0,046803 ± 0,012172 |
| | | | | 1 | 25 | 164,9731 | 0,033030 | |
| | | | | 2 | 32 | 40,15146 | 0,040181 | |
| | | | | 3 | 27 | 31,20532 | 0,033892 | |
| | | | | 4 | 30 | 267,2215 | 0,041239 | |
| | | | | 5 | 46 | 119,3715 | 0,058139 | |
| | | | | 6 | 29 | 35,27625 | 0,036410 | |
| | | | | 7 | 34 | 141,8205 | 0,043546 | |
| | | | | 8 | 43 | 47,79964 | 0,053970 | |
| 96 | 14 | 40,448100 | 0,0178068 | 0 | 36 | 53,67633 | 0,045294 | 0,069728 ± 0,015882 |
| | | | | 1 | 58 | 74,86037 | 0,072900 | |
| | | | | 2 | 71 | 87,87993 | 0,089219 | |
| | | | | 3 | 50 | 70,12332 | 0,062879 | |
| | | | | 4 | 44 | 57,67804 | 0,055309 | |
| | | | | 5 | 70 | 190,2444 | 0,088884 | |
| | | | | 6 | 52 | 78,04046 | 0,065428 | |
| | | | | 7 | 56 | 73,44163 | 0,070393 | |
| | | | | 8 | 67 | 465,9823 | 0,091011 | |
| 126 | 13 | 24,697700 | 0,0163352 | 0 | 56 | 94,55207 | 0,070327 | 0,080432 ± 0,017345 |
| | | | | 1 | 52 | 78,03157 | 0,065274 | |
| | | | | 2 | 63 | 454,8856 | 0,082008 | |
| | | | | 3 | 70 | 92,53425 | 0,087835 | |
| | | | | 4 | 80 | 140,3428 | 0,100484 | |
| | | | | 5 | 74 | 156,9128 | 0,093047 | |
| | | | | 6 | 44 | 70,29041 | 0,055244 | |
| | | | | 7 | 85 | 220,4272 | 0,107058 | |
| | | | | 8 | 48 | 61,46434 | 0,060225 | |
| | | | | 9 | 66 | 85,56765 | 0,082812 | |

ANEXO C – RESULTADOS CENÁRIO 3

Tabela 10: Resultados cenário 3 - 400 veículos

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 70 | 18 | 23,637500 | 0,0225933 | 0 | 65 | 105,837 | 0,081659 | 0,091346 ± 0,019099 |
| | | | | 1 | 98 | 207,5626 | 0,123330 | |
| | | | | 2 | 92 | 353,7095 | 0,116897 | |
| | | | | 3 | 61 | 70,5935 | 0,076538 | |
| | | | | 4 | 75 | 116,9424 | 0,094202 | |
| | | | | 5 | 53 | 132,6478 | 0,066810 | |
| | | | | 6 | 81 | 100,9866 | 0,101654 | |
| | | | | 7 | 56 | 79,83571 | 0,070311 | |
| | | | | 8 | 79 | 126,3611 | 0,099238 | |
| | | | | 9 | 66 | 78,64003 | 0,082818 | |
| 78 | 14 | 73,552800 | 0,0183496 | 0 | 44 | 103,8926 | 0,055659 | 0,085540 ± 0,021250 |
| | | | | 1 | 92 | 162,4304 | 0,115898 | |
| | | | | 2 | 74 | 136,6863 | 0,093269 | |
| | | | | 3 | 87 | 154,8615 | 0,109609 | |
| | | | | 4 | 82 | 171,4983 | 0,103519 | |
| | | | | 5 | 41 | 102,5672 | 0,051923 | |
| | | | | 6 | 63 | 316,5347 | 0,082270 | |
| | | | | 7 | 68 | 189,9666 | 0,086338 | |
| | | | | 8 | 58 | 166,2938 | 0,073692 | |
| | | | | 9 | 66 | 127,003 | 0,083226 | |
| 122 | 13 | 39,704300 | 0,0163699 | 0 | 43 | 183,9601 | 0,054397 | 0,068169 ± 0,015040 |
| | | | | 1 | 62 | 153,837 | 0,077944 | |
| | | | | 2 | 47 | 739,5292 | 0,066075 | |
| | | | | 3 | 36 | 65,607 | 0,045191 | |
| | | | | 4 | 39 | 165,2985 | 0,049329 | |
| | | | | 5 | 58 | 214,3101 | 0,073198 | |
| | | | | 6 | 56 | 164,2327 | 0,070490 | |
| | | | | 7 | 59 | 120,3726 | 0,074095 | |
| | | | | 8 | 76 | 149,7316 | 0,095431 | |
| | | | | 9 | 60 | 179,4933 | 0,075539 | |
| 136 | 13 | 19,706100 | 0,0163396 | 0 | 38 | 41,7893 | 0,047694 | 0,051345 ± 0,008958 |
| | | | | 1 | 34 | 36,62972 | 0,042671 | |
| | | | | 2 | 28 | 31,3534 | 0,035145 | |
| | | | | 3 | 36 | 301,8008 | 0,049084 | |
| | | | | 4 | 43 | 47,96328 | 0,053972 | |
| | | | | 5 | 51 | 61,92955 | 0,064033 | |
| | | | | 6 | 36 | 231,4371 | 0,047488 | |
| | | | | 7 | 51 | 58,75218 | 0,064021 | |
| | | | | 8 | 44 | 48,95282 | 0,055227 | |
| | | | | 9 | 43 | 77,5241 | 0,054113 | |
| 144 | 19 | 24,529000 | 0,0238311 | 0 | 57 | 229,3383 | 0,072053 | 0,094274 ± 0,029890 |
| | | | | 1 | 62 | 99,9021 | 0,077804 | |
| | | | | 2 | 84 | 121,3559 | 0,105382 | |
| | | | | 3 | 81 | 214,7879 | 0,101890 | |
| | | | | 4 | 66 | 341,6922 | 0,083901 | |
| | | | | 5 | 46 | 68,15877 | 0,057713 | |
| | | | | 6 | 133 | 498,3874 | 0,167932 | |
| | | | | 7 | 64 | 97,92437 | 0,080302 | |

Continua na próxima página

Tabela 10 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 8 | 77 | 97,85597 | 0,096576 | |
| | | | | 9 | 79 | 148,7181 | 0,099188 | |
| 146 | 20 | 25,849000 | 0,0251252 | 0 | 94 | 107,4103 | 0,118024 | 0,087317 ± 0,022718 |
| | | | | 1 | 56 | 64,43014 | 0,070314 | |
| | | | | 2 | 73 | 102,1175 | 0,091746 | |
| | | | | 3 | 58 | 66,95333 | 0,072826 | |
| | | | | 4 | 39 | 43,97502 | 0,048965 | |
| | | | | 5 | 60 | 66,1621 | 0,075325 | |
| | | | | 6 | 57 | 63,80287 | 0,071562 | |
| | | | | 7 | 83 | 155,059 | 0,104552 | |
| | | | | 8 | 88 | 117,963 | 0,110572 | |
| 150 | 12 | 14,754900 | 0,0150716 | 0 | 39 | 42,97029 | 0,048961 | 0,050266 ± 0,008844 |
| | | | | 1 | 37 | 41,15693 | 0,046452 | |
| | | | | 2 | 41 | 80,97042 | 0,051678 | |
| | | | | 3 | 34 | 75,11953 | 0,042917 | |
| | | | | 4 | 40 | 46,74195 | 0,050228 | |
| | | | | 5 | 42 | 46,33499 | 0,052728 | |
| | | | | 6 | 53 | 61,51264 | 0,066550 | |
| | | | | 7 | 50 | 60,16698 | 0,062792 | |
| | | | | 8 | 32 | 37,42303 | 0,040182 | |
| 152 | 13 | 14,535800 | 0,016317 | 0 | 51 | 57,46702 | 0,064014 | 0,046732 ± 0,011436 |
| | | | | 1 | 33 | 37,29112 | 0,041421 | |
| | | | | 2 | 22 | 24,26091 | 0,027612 | |
| | | | | 3 | 41 | 45,47786 | 0,051460 | |
| | | | | 4 | 45 | 49,17678 | 0,056478 | |
| | | | | 5 | 42 | 45,71742 | 0,052712 | |
| | | | | 6 | 45 | 49,32348 | 0,056478 | |
| | | | | 7 | 28 | 31,72459 | 0,035146 | |
| | | | | 8 | 36 | 59,74009 | 0,045273 | |
| 154 | 13 | 15,538100 | 0,0163254 | 0 | 36 | 42,13039 | 0,045205 | 0,052016 ± 0,013993 |
| | | | | 1 | 53 | 71,99213 | 0,066599 | |
| | | | | 2 | 60 | 95,71641 | 0,075473 | |
| | | | | 3 | 34 | 38,75302 | 0,042689 | |
| | | | | 4 | 55 | 76,51733 | 0,069121 | |
| | | | | 5 | 25 | 28,24636 | 0,031388 | |
| | | | | 6 | 38 | 43,25547 | 0,047711 | |
| | | | | 7 | 42 | 47,59911 | 0,052732 | |
| | | | | 8 | 38 | 49,69252 | 0,047740 | |
| 156 | 14 | 16,117900 | 0,0175694 | 0 | 23 | 26,13578 | 0,028863 | 0,046380 ± 0,010657 |
| | | | | 1 | 48 | 51,75379 | 0,060227 | |
| | | | | 2 | 35 | 56,00644 | 0,043983 | |
| | | | | 3 | 48 | 51,75293 | 0,060227 | |
| | | | | 4 | 40 | 43,4119 | 0,050190 | |
| | | | | 5 | 32 | 200,2288 | 0,041789 | |
| | | | | 6 | 35 | 38,01308 | 0,043916 | |

Continua na próxima página

Tabela 10 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 7 | 25 | 26,75178 | 0,031368 | |
| | | | | 8 | 40 | 47,55286 | 0,050203 | |
| | | | | 9 | 42 | 111,5524 | 0,053038 | |
| 158 | 13 | 22,766100 | 0,0163346 | 0 | 34 | 70,55731 | 0,042768 | 0,048105 ± 0,011321 |
| | | | | 1 | 44 | 97,37598 | 0,055375 | |
| | | | | 2 | 35 | 171,8535 | 0,044780 | |
| | | | | 3 | 39 | 42,2289 | 0,048923 | |
| | | | | 4 | 24 | 25,91268 | 0,030106 | |
| | | | | 5 | 38 | 56,36999 | 0,047711 | |
| | | | | 6 | 50 | 104,7229 | 0,062898 | |
| | | | | 7 | 33 | 85,38519 | 0,041596 | |
| | | | | 8 | 31 | 63,35706 | 0,038990 | |
| 160 | 14 | 25,589400 | 0,017603 | 0 | 43 | 64,46108 | 0,054007 | 0,048341 ± 0,013080 |
| | | | | 1 | 43 | 56,80954 | 0,053980 | |
| | | | | 2 | 32 | 44,51139 | 0,040179 | |
| | | | | 3 | 38 | 44,49632 | 0,047685 | |
| | | | | 4 | 42 | 48,48536 | 0,052702 | |
| | | | | 5 | 24 | 36,30261 | 0,030145 | |
| | | | | 6 | 31 | 179,6033 | 0,040144 | |
| | | | | 7 | 44 | 56,82921 | 0,055231 | |
| | | | | 8 | 27 | 32,14448 | 0,033883 | |
| 162 | 15 | 19,676300 | 0,0188422 | 0 | 34 | 44,81538 | 0,042710 | 0,039431 ± 0,006538 |
| | | | | 1 | 21 | 28,50664 | 0,026384 | |
| | | | | 2 | 35 | 40,75074 | 0,043943 | |
| | | | | 3 | 30 | 36,18872 | 0,037670 | |
| | | | | 4 | 30 | 37,96926 | 0,037678 | |
| | | | | 5 | 39 | 45,37665 | 0,048965 | |
| | | | | 6 | 26 | 33,12314 | 0,032655 | |
| | | | | 7 | 30 | 36,02352 | 0,037670 | |
| | | | | 8 | 33 | 39,14632 | 0,041435 | |
| 164 | 14 | 15,690500 | 0,0175821 | 0 | 19 | 25,25415 | 0,023882 | 0,038578 ± 0,008394 |
| | | | | 1 | 34 | 37,92018 | 0,042698 | |
| | | | | 2 | 38 | 40,41686 | 0,047713 | |
| | | | | 3 | 30 | 49,62455 | 0,037772 | |
| | | | | 4 | 22 | 24,92932 | 0,027630 | |
| | | | | 5 | 35 | 45,51681 | 0,043988 | |
| | | | | 6 | 36 | 41,68017 | 0,045218 | |
| | | | | 7 | 24 | 26,46218 | 0,030139 | |
| | | | | 8 | 36 | 38,81046 | 0,045204 | |
| | | | | 9 | 33 | 52,91124 | 0,041538 | |

ANEXO D – RESULTADOS CENÁRIO 4

Tabela 11: Resultados cenário 4 - 200 veículos

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 60 | 19 | 62,959800 | 0,0504898 | 0 | 72 | 118,0066 | 0,183510 | 0,185965 ± 0,026284 |
| | | | | 1 | 69 | 141,3241 | 0,177250 | |
| | | | | 2 | 92 | 298,7243 | 0,243960 | |
| | | | | 3 | 67 | 112,9018 | 0,170903 | |
| | | | | 4 | 69 | 160,5121 | 0,178361 | |
| | | | | 5 | 61 | 165,0584 | 0,159210 | |
| | | | | 6 | 82 | 154,2472 | 0,209930 | |
| | | | | 7 | 82 | 153,2461 | 0,204929 | |
| | | | | 8 | 61 | 166,1584 | 0,169310 | |
| | | | | 9 | 61 | 166,0284 | 0,162290 | |
| 64 | 25 | 35,811800 | 0,0633028 | 0 | 89 | 102,5909 | 0,224746 | 0,223349 ± 0,028941 |
| | | | | 1 | 68 | 80,96267 | 0,171774 | |
| | | | | 2 | 103 | 119,1551 | 0,260109 | |
| | | | | 3 | 90 | 155,458 | 0,228685 | |
| | | | | 4 | 82 | 221,6719 | 0,211684 | |
| | | | | 5 | 71 | 169,1351 | 0,182205 | |
| | | | | 6 | 103 | 120,1824 | 0,260132 | |
| | | | | 7 | 90 | 156,457 | 0,237685 | |
| | | | | 8 | 89 | 156,356 | 0,233785 | |
| | | | | 9 | 88 | 155,356 | 0,222686 | |
| 72 | 13 | 60,170400 | 0,0347267 | 0 | 32 | 104,044 | 0,082947 | 0,093493 ± 0,025562 |
| | | | | 1 | 56 | 148,2196 | 0,143671 | |
| | | | | 2 | 26 | 73,95544 | 0,066915 | |
| | | | | 3 | 40 | 115,3328 | 0,103013 | |
| | | | | 4 | 28 | 100,0047 | 0,073031 | |
| | | | | 5 | 27 | 173,1828 | 0,075856 | |
| | | | | 6 | 25 | 95,52982 | 0,065545 | |
| | | | | 7 | 40 | 89,71369 | 0,102029 | |
| | | | | 8 | 43 | 293,2628 | 0,122376 | |
| | | | | 9 | 39 | 89,41216 | 0,099544 | |

Tabela 12: Resultados cenário 4 - 400 veículos

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 70 | 20 | 27,051300 | 0,0251437 | 0 | 77 | 89,84093 | 0,096723 | 0,093056 ± 0,020607 |
| | | | | 1 | 70 | 81,52162 | 0,087930 | |
| | | | | 2 | 85 | 95,67587 | 0,106755 | |
| | | | | 3 | 86 | 142,2042 | 0,108290 | |
| | | | | 4 | 86 | 101,6067 | 0,108035 | |
| | | | | 5 | 65 | 102,3753 | 0,081811 | |
| | | | | 6 | 47 | 54,52768 | 0,059037 | |
| | | | | 7 | 97 | 191,5578 | 0,122390 | |
| | | | | 8 | 74 | 412,9311 | 0,097710 | |
| | | | | 9 | 49 | 102,4348 | 0,061877 | |
| 88 | 12 | 103,909000 | 0,0163347 | 0 | 31 | 40,5925 | 0,038927 | 0,057551 ± 0,017870 |
| | | | | 1 | 25 | 44,70085 | 0,031448 | |
| | | | | 2 | 66 | 358,8412 | 0,085590 | |
| | | | | 3 | 33 | 284,6939 | 0,044895 | |
| | | | | 4 | 49 | 65,40517 | 0,061535 | |
| | | | | 5 | 53 | 64,33283 | 0,066533 | |
| | | | | 6 | 41 | 65,68846 | 0,051536 | |
| | | | | 7 | 37 | 50,65194 | 0,046470 | |
| | | | | 8 | 54 | 72,69942 | 0,067816 | |
| | | | | 9 | 64 | 153,906 | 0,080755 | |
| 90 | 15 | 23,242200 | 0,0188461 | 0 | 56 | 128,7049 | 0,070578 | 0,065432 ± 0,022481 |
| | | | | 1 | 61 | 84,49537 | 0,076601 | |
| | | | | 2 | 93 | 118,4628 | 0,116747 | |
| | | | | 3 | 57 | 79,27718 | 0,071579 | |
| | | | | 4 | 43 | 133,8991 | 0,054451 | |
| | | | | 5 | 34 | 202,2128 | 0,044219 | |
| | | | | 6 | 60 | 133,642 | 0,075594 | |
| | | | | 7 | 37 | 72,39413 | 0,046559 | |
| | | | | 8 | 46 | 75,85896 | 0,057815 | |
| | | | | 9 | 32 | 41,08719 | 0,040172 | |
| 92 | 14 | 18,772500 | 0,0175866 | 0 | 62 | 73,04223 | 0,077840 | 0,065844 ± 0,024846 |
| | | | | 1 | 40 | 136,4054 | 0,050910 | |
| | | | | 2 | 64 | 76,24726 | 0,080355 | |
| | | | | 3 | 30 | 42,18165 | 0,037695 | |
| | | | | 4 | 89 | 679,0032 | 0,120016 | |
| | | | | 5 | 35 | 43,13944 | 0,043950 | |
| | | | | 6 | 65 | 125,1329 | 0,081862 | |
| | | | | 7 | 37 | 49,47225 | 0,046478 | |
| | | | | 8 | 52 | 69,31935 | 0,065320 | |
| | | | | 9 | 43 | 56,46009 | 0,054011 | |
| 100 | 18 | 27,842600 | 0,0226018 | 0 | 129 | 498,8795 | 0,163677 | 0,110554 ± 0,026873 |
| | | | | 1 | 89 | 196,0188 | 0,111983 | |
| | | | | 2 | 101 | 517,9194 | 0,129338 | |
| | | | | 3 | 67 | 135,0991 | 0,084247 | |
| | | | | 4 | 49 | 908,5918 | 0,077155 | |
| | | | | 5 | 71 | 94,94909 | 0,089106 | |
| | | | | 6 | 75 | 566,5157 | 0,098395 | |
| | | | | 7 | 81 | 654,2475 | 0,106933 | |

Continua na próxima página

Tabela 12 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 8 | 106 | 853,7667 | 0,139898 | |
| | | | | 9 | 76 | 851,0016 | 0,104809 | |
| 102 | 14 | 23,175700 | 0,0176425 | 0 | 65 | 78,02807 | 0,081695 | 0,069992 ± 0,018821 |
| | | | | 1 | 33 | 42,42275 | 0,041494 | |
| | | | | 2 | 58 | 88,58293 | 0,073030 | |
| | | | | 3 | 73 | 102,1729 | 0,091847 | |
| | | | | 4 | 32 | 39,70533 | 0,040227 | |
| | | | | 5 | 70 | 84,00122 | 0,087979 | |
| | | | | 6 | 66 | 176,4637 | 0,083914 | |
| | | | | 7 | 55 | 85,49778 | 0,069264 | |
| | | | | 8 | 42 | 69,25729 | 0,052925 | |
| | | | | 9 | 61 | 162,2902 | 0,077546 | |
| 106 | 19 | 49,305600 | 0,0239263 | 0 | 80 | 267,2374 | 0,101064 | 0,103890 ± 0,015547 |
| | | | | 1 | 75 | 140,1134 | 0,094224 | |
| | | | | 2 | 91 | 122,6585 | 0,114186 | |
| | | | | 3 | 77 | 197,3267 | 0,096953 | |
| | | | | 4 | 60 | 127,4647 | 0,075435 | |
| | | | | 5 | 105 | 213,0736 | 0,131974 | |
| | | | | 6 | 87 | 119,8156 | 0,109173 | |
| | | | | 7 | 76 | 137,4949 | 0,095465 | |
| | | | | 8 | 94 | 297,5811 | 0,118653 | |
| | | | | 9 | 79 | 492,9434 | 0,101772 | |
| 110 | 18 | 104,951000 | 0,0229631 | 0 | 87 | 162,3412 | 0,109226 | 0,104738 ± 0,017403 |
| | | | | 1 | 94 | 145,304 | 0,117945 | |
| | | | | 2 | 104 | 358,5949 | 0,131152 | |
| | | | | 3 | 64 | 107,2181 | 0,080321 | |
| | | | | 4 | 81 | 119,086 | 0,101621 | |
| | | | | 5 | 71 | 245,4104 | 0,089540 | |
| | | | | 6 | 62 | 323,2869 | 0,078817 | |
| | | | | 7 | 94 | 565,3718 | 0,120053 | |
| | | | | 8 | 91 | 158,7719 | 0,114221 | |
| | | | | 9 | 83 | 243,1187 | 0,104487 | |
| 112 | 11 | 15,312800 | 0,0138046 | 0 | 44 | 53,21039 | 0,055199 | 0,060717 ± 0,016665 |
| | | | | 1 | 63 | 135,9079 | 0,079224 | |
| | | | | 2 | 29 | 35,48557 | 0,036382 | |
| | | | | 3 | 55 | 124,1081 | 0,069187 | |
| | | | | 4 | 46 | 82,97115 | 0,057786 | |
| | | | | 5 | 47 | 57,54318 | 0,058964 | |
| | | | | 6 | 33 | 101,9426 | 0,041650 | |
| | | | | 7 | 73 | 383,6597 | 0,093368 | |
| | | | | 8 | 45 | 52,88959 | 0,056450 | |
| | | | | 9 | 47 | 58,04683 | 0,058965 | |
| 114 | 14 | 19,139600 | 0,0175747 | 0 | 50 | 60,06168 | 0,062742 | 0,056871 ± 0,015029 |
| | | | | 1 | 68 | 106,7211 | 0,085410 | |
| | | | | 2 | 33 | 44,17312 | 0,041423 | |
| | | | | 3 | 39 | 49,23114 | 0,048945 | |
| | | | | 4 | 35 | 58,25506 | 0,043974 | |
| | | | | 5 | 28 | 53,98716 | 0,035210 | |
| | | | | 6 | 56 | 224,6616 | 0,071231 | |

Continua na próxima página

Tabela 12 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 7 | 45 | 331,5743 | 0,059204 | |
| | | | | 8 | 50 | 56,55294 | 0,062732 | |
| | | | | 9 | 46 | 86,48723 | 0,057836 | |
| 116 | 13 | 20,078300 | 0,0163306 | 0 | 45 | 53,78212 | 0,056474 | 0,048796 ± 0,010739 |
| | | | | 1 | 27 | 31,36332 | 0,033881 | |
| | | | | 2 | 32 | 226,5752 | 0,042114 | |
| | | | | 3 | 27 | 202,8869 | 0,035742 | |
| | | | | 4 | 37 | 55,98665 | 0,046475 | |
| | | | | 5 | 37 | 173,823 | 0,047405 | |
| | | | | 6 | 56 | 69,62583 | 0,070287 | |
| | | | | 7 | 37 | 48,98443 | 0,046449 | |
| | | | | 8 | 43 | 104,8151 | 0,054212 | |
| | | | | 9 | 43 | 186,95 | 0,054920 | |
| 146 | 14 | 23,149300 | 0,0175965 | 0 | 70 | 106,8294 | 0,087943 | 0,058875 ± 0,015523 |
| | | | | 1 | 47 | 121,6521 | 0,059329 | |
| | | | | 2 | 34 | 68,7413 | 0,042797 | |
| | | | | 3 | 31 | 108,7225 | 0,039368 | |
| | | | | 4 | 44 | 76,8952 | 0,055322 | |
| | | | | 5 | 48 | 60,08586 | 0,060254 | |
| | | | | 6 | 53 | 74,37189 | 0,066560 | |
| | | | | 7 | 31 | 43,67927 | 0,038932 | |
| | | | | 8 | 54 | 90,25599 | 0,067876 | |
| | | | | 9 | 56 | 88,21199 | 0,070366 | |
| 148 | 13 | 17,151500 | 0,01632 | 0 | 30 | 304,0064 | 0,041393 | 0,047393 ± 0,006320 |
| | | | | 1 | 40 | 153,2843 | 0,050881 | |
| | | | | 2 | 28 | 34,7309 | 0,035143 | |
| | | | | 3 | 41 | 93,36796 | 0,051653 | |
| | | | | 4 | 42 | 51,3726 | 0,052713 | |
| | | | | 5 | 36 | 44,43213 | 0,045184 | |
| | | | | 6 | 36 | 52,24641 | 0,045211 | |
| | | | | 7 | 37 | 196,9208 | 0,047704 | |
| | | | | 8 | 37 | 46,30808 | 0,046441 | |
| | | | | 9 | 45 | 206,2228 | 0,057602 | |
| 150 | 12 | 20,828600 | 0,0151042 | 0 | 31 | 439,8966 | 0,049035 | 0,050542 ± 0,013336 |
| | | | | 1 | 28 | 37,74946 | 0,035182 | |
| | | | | 2 | 48 | 59,77429 | 0,060288 | |
| | | | | 3 | 29 | 452,36 | 0,047617 | |
| | | | | 4 | 20 | 30,28974 | 0,025147 | |
| | | | | 5 | 55 | 92,47208 | 0,069209 | |
| | | | | 6 | 47 | 67,49497 | 0,059076 | |
| | | | | 7 | 48 | 57,85653 | 0,060279 | |
| | | | | 8 | 45 | 94,0371 | 0,056753 | |
| | | | | 9 | 34 | 65,31358 | 0,042838 | |
| 152 | 14 | 33,357300 | 0,0176398 | 0 | 43 | 370,6848 | 0,057621 | 0,052466 ± 0,013262 |
| | | | | 1 | 41 | 61,31248 | 0,051489 | |
| | | | | 2 | 32 | 342,3932 | 0,044312 | |
| | | | | 3 | 39 | 59,45481 | 0,048982 | |
| | | | | 4 | 59 | 280,4063 | 0,075530 | |
| | | | | 5 | 56 | 277,9131 | 0,071825 | |

Continua na próxima página

Tabela 12 – Continuação da página anterior

| 400 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|-----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 6 | 33 | 105,1 | 0,041756 | |
| | | | | 7 | 39 | 60,88115 | 0,048987 | |
| | | | | 8 | 42 | 64,04445 | 0,052750 | |
| | | | | 9 | 25 | 41,56253 | 0,031412 | |
| 158 | 14 | 16,032100 | 0,0175812 | 0 | 38 | 44,63713 | 0,047726 | 0,043728 ± 0,008729 |
| | | | | 1 | 47 | 139,9769 | 0,059740 | |
| | | | | 2 | 35 | 81,58609 | 0,044245 | |
| | | | | 3 | 30 | 35,97819 | 0,037682 | |
| | | | | 4 | 39 | 177,6286 | 0,050493 | |
| | | | | 5 | 41 | 51,29631 | 0,051509 | |
| | | | | 6 | 25 | 38,78657 | 0,031451 | |
| | | | | 7 | 32 | 36,10036 | 0,040183 | |
| | | | | 8 | 27 | 43,79972 | 0,033979 | |
| 9 | 32 | 52,84414 | 0,040278 | | | | | |
| 160 | 11 | 15,331600 | 0,013834 | 0 | 22 | 27,74291 | 0,027650 | 0,041340 ± 0,008257 |
| | | | | 1 | 28 | 32,18593 | 0,035173 | |
| | | | | 2 | 33 | 37,83857 | 0,041454 | |
| | | | | 3 | 37 | 42,31365 | 0,046478 | |
| | | | | 4 | 36 | 40,60607 | 0,045219 | |
| | | | | 5 | 34 | 47,23717 | 0,042759 | |
| | | | | 6 | 47 | 55,95787 | 0,059052 | |
| | | | | 7 | 29 | 33,85303 | 0,036432 | |
| | | | | 8 | 32 | 37,21591 | 0,040201 | |
| 9 | 31 | 42,19445 | 0,038980 | | | | | |
| 162 | 12 | 23,429300 | 0,0151252 | 0 | 42 | 348,3925 | 0,057916 | 0,043987 ± 0,010104 |
| | | | | 1 | 31 | 46,50944 | 0,038981 | |
| | | | | 2 | 38 | 46,26326 | 0,047727 | |
| | | | | 3 | 38 | 48,49996 | 0,047738 | |
| | | | | 4 | 30 | 43,43839 | 0,037715 | |
| | | | | 5 | 49 | 69,12288 | 0,061590 | |
| | | | | 6 | 27 | 36,5163 | 0,033929 | |
| | | | | 7 | 25 | 30,11098 | 0,031398 | |
| | | | | 8 | 29 | 40,03733 | 0,036447 | |
| 9 | 32 | 337,4043 | 0,046432 | | | | | |

Tabela 13: Resultados cenário 5 - 200 veículos

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 24 | 2 | 2,115770 | 0,005053 | 0 | 5 | 5,296686 | 0,012632 | 0,008335 ± 0,002676 |
| | | | | 1 | 3 | 3,171492 | 0,007579 | |
| | | | | 2 | 2 | 2,115767 | 0,005053 | |
| | | | | 3 | 2 | 2,115767 | 0,005053 | |
| | | | | 4 | 4 | 4,085513 | 0,010102 | |
| | | | | 5 | 5 | 5,197906 | 0,012630 | |
| | | | | 6 | 3 | 3,065365 | 0,007576 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,061008 | 0,007576 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,049622 | 0,007576 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 9 | 3 | 3,061008 | 0,007576 | |
| 26 | 12 | 13,084200 | 0,030335 | 0 | 39 | 147,007790 | 0,104925 | 0,078782 ± 0,023715 |
| | | | | 1 | 26 | 110,431520 | 0,071145 | |
| | | | | 2 | 26 | 28,141825 | 0,065720 | |
| | | | | 3 | 27 | 216,832908 | 0,087543 | |
| | | | | 4 | 20 | 22,093219 | 0,050567 | |
| | | | | 5 | 21 | 23,111510 | 0,053092 | |
| | | | | 6 | 21 | 24,307193 | 0,053127 | |
| | | | | 7 | 33 | 105,850246 | 0,087203 | |
| | | | | 8 | 30 | 231,080832 | 0,095702 | |
| | | | | 9 | 47 | 50,653320 | 0,118796 | |
| 30 | 2 | 2,051090 | 0,005062 | 0 | 3 | 3,044175 | 0,007591 | 0,006582 ± 0,001308 |
| | | | | 1 | 2 | 2,051087 | 0,005062 | |
| | | | | 2 | 3 | 3,044175 | 0,007591 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,063672 | 0,007592 | |
| | | | | 4 | 3 | 3,331597 | 0,007602 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,051087 | 0,005062 | |
| | | | | 6 | 2 | 2,051087 | 0,005062 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,331597 | 0,007602 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,044175 | 0,007591 | |
| | | | | 9 | 2 | 2,051087 | 0,005062 | |
| 32 | 7 | 8,082750 | 0,017685 | 0 | 13 | 13,828386 | 0,032816 | 0,038460 ± 0,009468 |
| | | | | 1 | 22 | 24,739172 | 0,055565 | |
| | | | | 2 | 17 | 46,302001 | 0,044007 | |
| | | | | 3 | 15 | 17,036982 | 0,037889 | |
| | | | | 4 | 14 | 14,860650 | 0,035340 | |
| | | | | 5 | 11 | 54,917670 | 0,030358 | |
| | | | | 6 | 17 | 63,364250 | 0,045105 | |
| | | | | 7 | 19 | 20,681976 | 0,047972 | |
| | | | | 8 | 10 | 10,504877 | 0,025240 | |
| | | | | 9 | 12 | 13,504217 | 0,030309 | |
| 34 | 12 | 16,400100 | 0,030486 | 0 | 42 | 69,042814 | 0,107222 | 0,081674 ± 0,021893 |
| | | | | 1 | 22 | 27,606348 | 0,055795 | |
| | | | | 2 | 22 | 36,942869 | 0,056202 | |
| | | | | 3 | 25 | 169,822700 | 0,078275 | |
| | | | | 4 | 36 | 108,150620 | 0,095217 | |
| | | | | 5 | 44 | 61,555559 | 0,111841 | |
| | | | | 6 | 30 | 34,440223 | 0,075970 | |
| | | | | 7 | 36 | 44,129121 | 0,091263 | |
| | | | | 8 | 37 | 55,249297 | 0,094198 | |
| | | | | 9 | 20 | 25,869553 | 0,050752 | |
| 36 | 2 | 2,060770 | 0,005063 | 0 | 3 | 3,082526 | 0,007594 | 0,009368 ± 0,003595 |
| | | | | 1 | 3 | 3,097389 | 0,007595 | |
| | | | | 2 | 2 | 2,060766 | 0,005063 | |
| | | | | 3 | 4 | 4,151577 | 0,010127 | |
| | | | | 4 | 7 | 7,658224 | 0,017737 | |
| | | | | 5 | 3 | 3,079926 | 0,007594 | |
| | | | | 6 | 3 | 3,079926 | 0,007594 | |
| | | | | 7 | 4 | 4,123179 | 0,010126 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 8 | 5 | 5,199236 | 0,012659 | |
| | | | | 9 | 3 | 3,068203 | 0,007594 | |
| 40 | 11 | 12,393100 | 0,027854 | 0 | 19 | 26,268029 | 0,048299 | 0,073316 ± 0,014541 |
| | | | | 1 | 19 | 86,904516 | 0,053557 | |
| | | | | 2 | 27 | 29,375496 | 0,068334 | |
| | | | | 3 | 28 | 62,696240 | 0,072499 | |
| | | | | 4 | 30 | 32,842998 | 0,075933 | |
| | | | | 5 | 28 | 31,138823 | 0,070887 | |
| | | | | 6 | 34 | 87,974300 | 0,088892 | |
| | | | | 7 | 27 | 101,775765 | 0,073556 | |
| | | | | 8 | 36 | 71,423295 | 0,092627 | |
| | | | | 9 | 35 | 37,854947 | 0,088573 | |
| 58 | 6 | 6,304110 | 0,015247 | 0 | 7 | 7,267054 | 0,017783 | 0,026182 ± 0,008803 |
| | | | | 1 | 7 | 7,616706 | 0,017803 | |
| | | | | 2 | 8 | 8,603065 | 0,020340 | |
| | | | | 3 | 17 | 17,838842 | 0,043199 | |
| | | | | 4 | 8 | 8,493044 | 0,020334 | |
| | | | | 5 | 10 | 10,604880 | 0,025417 | |
| | | | | 6 | 8 | 8,977328 | 0,020361 | |
| | | | | 7 | 12 | 12,836507 | 0,030506 | |
| | | | | 8 | 15 | 15,816656 | 0,038121 | |
| | | | | 9 | 11 | 11,640919 | 0,027957 | |
| 62 | 10 | 11,185600 | 0,025306 | 0 | 19 | 20,172667 | 0,048048 | 0,054405 ± 0,013609 |
| | | | | 1 | 29 | 33,092003 | 0,073410 | |
| | | | | 2 | 16 | 17,653547 | 0,040482 | |
| | | | | 3 | 20 | 24,486019 | 0,050684 | |
| | | | | 4 | 29 | 31,308032 | 0,073353 | |
| | | | | 5 | 19 | 22,067061 | 0,048109 | |
| | | | | 6 | 21 | 22,460042 | 0,053111 | |
| | | | | 7 | 27 | 29,849328 | 0,068316 | |
| | | | | 8 | 22 | 23,339725 | 0,055634 | |
| | | | | 9 | 13 | 14,807379 | 0,032907 | |
| 64 | 7 | 7,678110 | 0,017668 | 0 | 12 | 13,111115 | 0,030288 | 0,056097 ± 0,049547 |
| | | | | 1 | 19 | 20,593377 | 0,047952 | |
| | | | | 2 | 70 | 78,395203 | 0,176718 | |
| | | | | 3 | 14 | 15,581737 | 0,035341 | |
| | | | | 4 | 44 | 72,423993 | 0,111688 | |
| | | | | 5 | 16 | 16,887290 | 0,040371 | |
| | | | | 6 | 9 | 9,871075 | 0,022716 | |
| | | | | 7 | 17 | 18,106111 | 0,042898 | |
| | | | | 8 | 10 | 11,270257 | 0,025247 | |
| | | | | 9 | 11 | 11,566955 | 0,027754 | |
| 88 | 2 | 2,005010 | 0,005049 | 0 | 3 | 3,025754 | 0,007574 | 0,006816 ± 0,001704 |
| | | | | 1 | 3 | 3,025754 | 0,007574 | |
| | | | | 2 | 3 | 3,035073 | 0,007574 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,035073 | 0,007574 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,005007 | 0,005049 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,005007 | 0,005049 | |
| | | | | 6 | 2 | 2,005007 | 0,005049 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 7 | 3 | 3,025754 | 0,007574 | |
| | | | | 8 | 2 | 2,005007 | 0,005049 | |
| | | | | 9 | 4 | 4,064101 | 0,010099 | |
| 90 | 2 | 2,022400 | 0,005042 | 0 | 2 | 2,022402 | 0,005042 | 0,007312 ± 0,002208 |
| | | | | 1 | 3 | 3,042877 | 0,007564 | |
| | | | | 2 | 4 | 4,026966 | 0,010085 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,179081 | 0,007566 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,022402 | 0,005042 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,022402 | 0,005042 | |
| | | | | 6 | 4 | 4,221473 | 0,010088 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,042515 | 0,007564 | |
| | | | | 8 | 2 | 2,022402 | 0,005042 | |
| 96 | 6 | 6,894530 | 0,015155 | 0 | 7 | 8,736149 | 0,017697 | 0,022228 ± 0,005024 |
| | | | | 1 | 9 | 10,058867 | 0,022726 | |
| | | | | 2 | 9 | 9,932648 | 0,022723 | |
| | | | | 3 | 10 | 11,331775 | 0,025255 | |
| | | | | 4 | 6 | 6,894527 | 0,015155 | |
| | | | | 5 | 11 | 13,321874 | 0,027800 | |
| | | | | 6 | 7 | 7,904333 | 0,017678 | |
| | | | | 7 | 10 | 11,627461 | 0,025261 | |
| | | | | 8 | 12 | 13,793394 | 0,030310 | |
| 98 | 9 | 9,899800 | 0,022721 | 0 | 11 | 11,746316 | 0,027763 | 0,039646 ± 0,009684 |
| | | | | 1 | 17 | 19,553479 | 0,042937 | |
| | | | | 2 | 9 | 10,473647 | 0,022734 | |
| | | | | 3 | 22 | 27,126837 | 0,055609 | |
| | | | | 4 | 16 | 17,525301 | 0,040392 | |
| | | | | 5 | 17 | 19,412802 | 0,042934 | |
| | | | | 6 | 15 | 16,414460 | 0,037867 | |
| | | | | 7 | 20 | 21,782086 | 0,050487 | |
| | | | | 8 | 14 | 14,957238 | 0,035335 | |
| 102 | 2 | 2,005800 | 0,005048 | 0 | 5 | 5,035097 | 0,012621 | 0,007320 ± 0,002210 |
| | | | | 1 | 3 | 3,033134 | 0,007573 | |
| | | | | 2 | 2 | 2,005798 | 0,005048 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,012023 | 0,007572 | |
| | | | | 4 | 3 | 3,056316 | 0,007573 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,005798 | 0,005048 | |
| | | | | 6 | 3 | 3,012023 | 0,007572 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,024336 | 0,007572 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,018242 | 0,007572 | |
| 106 | 2 | 2,864320 | 0,005039 | 0 | 5 | 5,467659 | 0,012583 | 0,008880 ± 0,003440 |
| | | | | 1 | 4 | 4,526269 | 0,010068 | |
| | | | | 2 | 2 | 2,864323 | 0,005039 | |
| | | | | 3 | 2 | 2,864323 | 0,005039 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,864323 | 0,005039 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,864323 | 0,005039 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 6 | 3 | 58,456950 | 0,010742 | |
| | | | | 7 | 4 | 57,647193 | 0,012569 | |
| | | | | 8 | 4 | 6,210993 | 0,010083 | |
| | | | | 9 | 5 | 7,662292 | 0,012603 | |
| 108 | 2 | 2,077960 | 0,005041 | 0 | 2 | 2,077958 | 0,005041 | 0,006806 ± 0,001701 |
| | | | | 1 | 3 | 3,095744 | 0,007561 | |
| | | | | 2 | 3 | 3,101280 | 0,007561 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,095744 | 0,007561 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,077958 | 0,005041 | |
| | | | | 5 | 3 | 3,527895 | 0,007568 | |
| | | | | 6 | 2 | 2,077958 | 0,005041 | |
| | | | | 7 | 2 | 2,077958 | 0,005041 | |
| | | | | 8 | 4 | 4,098260 | 0,010081 | |
| 9 | 3 | 3,101280 | 0,007561 | | | | | |
| 110 | 11 | 14,948600 | 0,027863 | 0 | 24 | 67,091375 | 0,062349 | 0,066295 ± 0,017570 |
| | | | | 1 | 31 | 83,563212 | 0,080351 | |
| | | | | 2 | 25 | 27,629027 | 0,063152 | |
| | | | | 3 | 29 | 58,268216 | 0,074153 | |
| | | | | 4 | 33 | 235,496850 | 0,099842 | |
| | | | | 5 | 31 | 35,247928 | 0,078333 | |
| | | | | 6 | 22 | 24,398099 | 0,055576 | |
| | | | | 7 | 18 | 20,473669 | 0,045484 | |
| | | | | 8 | 25 | 30,401644 | 0,063223 | |
| 9 | 16 | 20,371286 | 0,040488 | | | | | |
| 114 | 8 | 10,231200 | 0,020294 | 0 | 17 | 19,026099 | 0,043028 | 0,045028 ± 0,008561 |
| | | | | 1 | 19 | 24,084382 | 0,048190 | |
| | | | | 2 | 16 | 43,508833 | 0,041920 | |
| | | | | 3 | 18 | 36,914599 | 0,046336 | |
| | | | | 4 | 15 | 16,368262 | 0,037953 | |
| | | | | 5 | 23 | 51,407753 | 0,059469 | |
| | | | | 6 | 16 | 17,439273 | 0,040482 | |
| | | | | 7 | 22 | 49,592671 | 0,056911 | |
| | | | | 8 | 12 | 14,705696 | 0,030417 | |
| 9 | 18 | 20,722963 | 0,045579 | | | | | |
| 116 | 3 | 3,237740 | 0,007583 | 0 | 5 | 5,975791 | 0,012655 | 0,009608 ± 0,002612 |
| | | | | 1 | 4 | 4,150462 | 0,010106 | |
| | | | | 2 | 3 | 3,474074 | 0,007590 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,237735 | 0,007583 | |
| | | | | 4 | 6 | 6,619390 | 0,015170 | |
| | | | | 5 | 3 | 3,237735 | 0,007583 | |
| | | | | 6 | 4 | 4,273711 | 0,010109 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,474074 | 0,007590 | |
| | | | | 8 | 4 | 4,150462 | 0,010106 | |
| 9 | 3 | 3,474074 | 0,007590 | | | | | |
| 122 | 14 | 31,619200 | 0,035649 | 0 | 26 | 30,237294 | 0,065560 | 0,086682 ± 0,019810 |
| | | | | 1 | 45 | 126,784899 | 0,115421 | |
| | | | | 2 | 29 | 31,848678 | 0,073097 | |
| | | | | 3 | 38 | 130,643304 | 0,098424 | |
| | | | | 4 | 33 | 37,618111 | 0,083200 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| | | | | 5 | 39 | 43,940723 | 0,098319 | |
| | | | | 6 | 46 | 52,643539 | 0,115979 | |
| | | | | 7 | 23 | 27,126932 | 0,058002 | |
| | | | | 8 | 32 | 35,233420 | 0,080660 | |
| | | | | 9 | 31 | 35,373233 | 0,078158 | |
| 132 | 2 | 2,029830 | 0,005046 | 0 | 2 | 2,029832 | 0,005046 | 0,007066 ± 0,002320 |
| | | | | 1 | 2 | 2,029832 | 0,005046 | |
| | | | | 2 | 3 | 3,517034 | 0,007579 | |
| | | | | 3 | 2 | 2,029832 | 0,005046 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,029832 | 0,005046 | |
| | | | | 5 | 4 | 4,091047 | 0,010092 | |
| | | | | 6 | 2 | 2,029832 | 0,005046 | |
| | | | | 7 | 4 | 4,243087 | 0,010095 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,167935 | 0,007571 | |
| | | | | 9 | 4 | 4,353358 | 0,010097 | |
| 140 | 2 | 2,314330 | 0,005057 | 0 | 2 | 2,314327 | 0,005057 | 0,007080 ± 0,001994 |
| | | | | 1 | 3 | 3,336682 | 0,007582 | |
| | | | | 2 | 2 | 2,314327 | 0,005057 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,318986 | 0,007582 | |
| | | | | 4 | 4 | 4,391810 | 0,010108 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,314327 | 0,005057 | |
| | | | | 6 | 4 | 4,785885 | 0,010119 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,744880 | 0,007594 | |
| | | | | 8 | 2 | 2,314327 | 0,005057 | |
| | | | | 9 | 3 | 3,336682 | 0,007582 | |
| 144 | 10 | 14,733300 | 0,025392 | 0 | 13 | 18,262911 | 0,032978 | 0,057634 ± 0,015421 |
| | | | | 1 | 34 | 43,354687 | 0,086105 | |
| | | | | 2 | 26 | 34,596036 | 0,065891 | |
| | | | | 3 | 23 | 28,888238 | 0,058234 | |
| | | | | 4 | 24 | 30,235207 | 0,060769 | |
| | | | | 5 | 20 | 27,490298 | 0,050714 | |
| | | | | 6 | 20 | 25,496259 | 0,050650 | |
| | | | | 7 | 15 | 21,111042 | 0,038053 | |
| | | | | 8 | 27 | 34,062038 | 0,068366 | |
| | | | | 9 | 25 | 60,242613 | 0,064577 | |
| 148 | 8 | 10,871200 | 0,020312 | 0 | 17 | 20,412306 | 0,043066 | 0,044167 ± 0,013019 |
| | | | | 1 | 11 | 13,827910 | 0,027888 | |
| | | | | 2 | 15 | 18,267540 | 0,038008 | |
| | | | | 3 | 29 | 34,505244 | 0,073454 | |
| | | | | 4 | 13 | 44,393934 | 0,034781 | |
| | | | | 5 | 18 | 37,834065 | 0,046359 | |
| | | | | 6 | 16 | 47,833533 | 0,042213 | |
| | | | | 7 | 14 | 34,735441 | 0,036398 | |
| | | | | 8 | 15 | 62,359152 | 0,041258 | |
| | | | | 9 | 23 | 26,940487 | 0,058242 | |
| | | | | 0 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 1 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 2 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 3 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 150 | 1 | 1,004650 | 0,002525 | 4 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | 0,002525 ± 0,000001 |
| | | | | 5 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 6 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 7 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 8 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| | | | | 9 | 1 | 1,004647 | 0,002525 | |
| 152 | 10 | 11,483800 | 0,025259 | 0 | 18 | 82,387206 | 0,048907 | 0,050823 ± 0,011065 |
| | | | | 1 | 29 | 36,502996 | 0,073330 | |
| | | | | 2 | 27 | 35,912965 | 0,068323 | |
| | | | | 3 | 17 | 20,303443 | 0,042959 | |
| | | | | 4 | 17 | 23,159885 | 0,043033 | |
| | | | | 5 | 21 | 28,528363 | 0,053156 | |
| | | | | 6 | 18 | 21,116704 | 0,045477 | |
| | | | | 7 | 17 | 22,324915 | 0,043010 | |
| | | | | 8 | 16 | 84,946629 | 0,044547 | |
| 9 | 18 | 21,683084 | 0,045491 | | | | | |
| 156 | 2 | 2,209980 | 0,005069 | 0 | 3 | 3,022618 | 0,007593 | 0,007855 ± 0,003035 |
| | | | | 1 | 5 | 6,029017 | 0,012694 | |
| | | | | 2 | 2 | 2,209979 | 0,005069 | |
| | | | | 3 | 4 | 4,302649 | 0,010134 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,209979 | 0,005069 | |
| | | | | 5 | 3 | 3,255798 | 0,007601 | |
| | | | | 6 | 2 | 2,209979 | 0,005069 | |
| | | | | 7 | 2 | 2,209979 | 0,005069 | |
| | | | | 8 | 5 | 5,084869 | 0,012656 | |
| 9 | 3 | 3,233495 | 0,007601 | | | | | |
| 158 | 11 | 14,266200 | 0,027750 | 0 | 40 | 51,574352 | 0,100905 | 0,094666 ± 0,024456 |
| | | | | 1 | 32 | 36,827610 | 0,080658 | |
| | | | | 2 | 43 | 55,279064 | 0,108470 | |
| | | | | 3 | 25 | 31,634022 | 0,063056 | |
| | | | | 4 | 59 | 79,378481 | 0,148887 | |
| | | | | 5 | 32 | 54,129448 | 0,080955 | |
| | | | | 6 | 35 | 40,797077 | 0,088227 | |
| | | | | 7 | 28 | 32,836729 | 0,070585 | |
| | | | | 8 | 42 | 157,831449 | 0,109061 | |
| 9 | 38 | 48,626373 | 0,095854 | | | | | |
| 160 | 10 | 13,086000 | 0,025257 | 0 | 21 | 78,090333 | 0,054947 | 0,054798 ± 0,009839 |
| | | | | 1 | 20 | 24,620688 | 0,050483 | |
| | | | | 2 | 13 | 16,014029 | 0,032814 | |
| | | | | 3 | 21 | 26,998161 | 0,053029 | |
| | | | | 4 | 27 | 81,931358 | 0,069721 | |
| | | | | 5 | 20 | 77,265089 | 0,052492 | |
| | | | | 6 | 22 | 37,457854 | 0,055764 | |
| | | | | 7 | 25 | 82,334311 | 0,064861 | |
| | | | | 8 | 24 | 30,767412 | 0,060603 | |
| 9 | 21 | 37,151591 | 0,053266 | | | | | |
| | | | | 0 | 53 | 89,737137 | 0,134763 | |
| | | | | 1 | 55 | 85,977953 | 0,139605 | |
| | | | | 2 | 44 | 71,279944 | 0,111767 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 162 | 14 | 16,904200 | 0,035391 | 3 | 49 | 74,950954 | 0,124322 | 0,132975 ± 0,021940 |
| | | | | 4 | 42 | 249,223595 | 0,120150 | |
| | | | | 5 | 66 | 303,377686 | 0,179970 | |
| | | | | 6 | 60 | 99,801187 | 0,152499 | |
| | | | | 7 | 43 | 210,546453 | 0,118440 | |
| | | | | 8 | 42 | 53,864945 | 0,106256 | |
| | | | | 9 | 53 | 213,666516 | 0,141981 | |
| 172 | 2 | 2,012830 | 0,005056 | 0 | 3 | 3,054251 | 0,007585 | 0,009613 ± 0,003542 |
| | | | | 1 | 4 | 4,080986 | 0,010114 | |
| | | | | 2 | 4 | 4,530592 | 0,010129 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,054251 | 0,007585 | |
| | | | | 4 | 7 | 7,824378 | 0,017722 | |
| | | | | 5 | 5 | 5,081807 | 0,012642 | |
| | | | | 6 | 2 | 2,012829 | 0,005056 | |
| | | | | 7 | 3 | 3,136546 | 0,007588 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,116528 | 0,007587 | |
| 9 | 4 | 4,198860 | 0,010118 | | | | | |
| 174 | 2 | 7,039470 | 0,005309 | 0 | 4 | 4,123551 | 0,010100 | 0,009137 ± 0,002061 |
| | | | | 1 | 3 | 7,725942 | 0,007769 | |
| | | | | 2 | 4 | 4,087173 | 0,010099 | |
| | | | | 3 | 3 | 3,078017 | 0,007575 | |
| | | | | 4 | 2 | 7,039465 | 0,005309 | |
| | | | | 5 | 3 | 3,275768 | 0,007580 | |
| | | | | 6 | 4 | 4,160660 | 0,010101 | |
| | | | | 7 | 5 | 5,283434 | 0,012628 | |
| | | | | 8 | 4 | 4,343071 | 0,010106 | |
| 9 | 4 | 4,213257 | 0,010102 | | | | | |
| 190 | 22 | 37,855400 | 0,056033 | 0 | 59 | 109,953433 | 0,168598 | 0,139756 ± 0,019960 |
| | | | | 1 | 60 | 110,922433 | 0,179598 | |
| | | | | 2 | 47 | 106,986689 | 0,128396 | |
| | | | | 3 | 58 | 68,922433 | 0,146684 | |
| | | | | 4 | 48 | 107,966679 | 0,138396 | |
| | | | | 5 | 47 | 106,964689 | 0,128526 | |
| | | | | 6 | 47 | 105,964689 | 0,124598 | |
| | | | | 7 | 47 | 106,984689 | 0,137684 | |
| | | | | 8 | 47 | 105,984689 | 0,126684 | |
| 9 | 46 | 105,894688 | 0,118396 | | | | | |
| 198 | 3 | 3,043480 | 0,007567 | 0 | 5 | 5,736604 | 0,012625 | 0,009589 ± 0,001994 |
| | | | | 1 | 3 | 3,043479 | 0,007567 | |
| | | | | 2 | 3 | 3,068062 | 0,007567 | |
| | | | | 3 | 4 | 4,111972 | 0,010090 | |
| | | | | 4 | 4 | 4,483948 | 0,010098 | |
| | | | | 5 | 4 | 4,062347 | 0,010089 | |
| | | | | 6 | 5 | 5,703489 | 0,012624 | |
| | | | | 7 | 4 | 4,127773 | 0,010091 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,055435 | 0,007567 | |
| 9 | 3 | 3,060521 | 0,007567 | | | | | |
| | | | | 0 | 4 | 4,148900 | 0,010107 | |
| | | | | 1 | 2 | 2,046281 | 0,005053 | |

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior

| 200 Veículos | | | | | | | | |
|--------------|----------|------------|----------|--------|--------|------------|----------|---------------------|
| Instante | Dijkstra | | | ACO | | | | Média ± dP |
| | Saltos | Tempo (ms) | Custo | Rodada | Saltos | Tempo (ms) | Custo | |
| 200 | 2 | 2,046280 | 0,005053 | 2 | 2 | 2,046281 | 0,005053 | 0,007833 ± 0,003662 |
| | | | | 3 | 3 | 3,304501 | 0,007586 | |
| | | | | 4 | 2 | 2,046281 | 0,005053 | |
| | | | | 5 | 2 | 2,046281 | 0,005053 | |
| | | | | 6 | 5 | 5,145307 | 0,012633 | |
| | | | | 7 | 2 | 2,046281 | 0,005053 | |
| | | | | 8 | 3 | 3,109320 | 0,007580 | |
| | | | | 9 | 6 | 6,244482 | 0,015161 | |