

## 5 Conclusões

O problema de roteirização de veículos possui um papel muito importante no gerenciamento da frota das empresas e durante décadas, as aplicações práticas estiveram voltadas apenas ao problema estático. Com os recentes avanços em tecnologias de informação foram disponibilizadas as ferramentas necessárias para que as empresas gerenciem suas frotas em tempo real. No entanto, estas novas tecnologias também introduziram mais complexidade na gestão da frota, revelando a necessidade do desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para roteirização dinâmica de veículos. Neste contexto, as contribuições desta tese são: uma revisão abrangente da literatura sobre problemas de roteirização estática e dinâmica de veículos e o desenvolvimento de algoritmos para resolvê-los.

Na revisão da literatura foi definido o problema de roteirização estática e apresentados modelos matemáticos que podem resolvê-lo. Em seguida, foram apresentadas as diferenças entre os problemas de roteirização estática e dinâmica. Uma taxonomia que divide os problemas de roteirização em quatro categorias, de acordo a evolução e com a qualidade da informação foi apresentada. A cada categoria foram apresentados os trabalhos que compõe o estado da arte para roteirização dinâmica. Na categoria de problemas dinâmicos e determinísticos, as abordagens de re-otimização foram definidas como modo contínuo e periódico, que dependem se o algoritmo de otimização é executado periodicamente ou ao longo do horizonte de planejamento. Foram definidas duas fases para solução do problema, a fase a-priori, na qual é resolvido um problema com os clientes já conhecidos e a fase a-posteriori, na qual são resolvidos vários subproblemas com a adição de novos clientes. As abordagens utilizadas na a-posteriori foram classificadas como métodos de re-roteirização e métodos de inserção. Foram definidas métricas para indicar o grau de dinamismo dos problemas dinâmicos. Além disso, foram apresentadas diversas aplicações do mundo real.

Para resolver o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo foi proposto um algoritmo híbrido do Sistema de Múltiplas Colônias de Formigas (MACS) com o método de Descida em Vizinhança Variável Aleatória (RVND). O algoritmo foi apresentado em detalhes e foram mostradas as modificações propostas nos métodos originalmente propostos. Através da aplicação do algoritmo a 56 instâncias de *benchmark* de Solomon (1987) demonstrou-se a eficiência do algoritmo, pois para 29 delas foram encontradas as melhores soluções conhecidas, para 23 foram encontradas soluções com o menor número de veículos conhecido e com GAP de distância total de no máximo 0,62% e apenas para 4 instâncias foram encontradas soluções com 1 veículo a mais, porém com distância total menor que nas melhores soluções conhecidas, com uma diferença média de -5,21%.

Para resolver o problema de roteirização dinâmica de veículos com janelas de tempo foi proposto um algoritmo genérico o qual foi utilizado como modelo para proposta de seis novos algoritmos. Estes algoritmos foram baseados no algoritmo de Inserção (PFIH), no método de Descida em Vizinhança Variável (VND) e no Sistema de Múltiplas Colônias de Formigas com Descida em Vizinhança Variável Aleatória (MACS-RVND). Estes algoritmos foram aplicados a 280 instâncias de *benchmark* propostas por Lackner (2004) e foi selecionado o melhor algoritmo, que por sua vez, foi comparado com os melhores resultados apresentados na literatura. Por se tratar de um problema relativamente novo, a literatura do problema dinâmico abordado ainda é escassa e os autores não disponibilizam todos os dados necessários para realizar uma comparação efetiva e não foi possível comparar o número de veículos utilizados pelos autores. No entanto, a comparação da distância média total e o percentual médio total de clientes não atendidos demonstrou que o algoritmo proposto fornece soluções de ótima qualidade, superando os resultados de todas as abordagens propostas na literatura.

## 5.1 Contribuições da Tese

1. Desenvolvimento e validação de um algoritmo híbrido inédito que se utiliza de Otimização por Colônia de Formigas e do método de Descida em Vizinhança Variável Aleatória para resolver o VRPTW e apresentação de resultados competitivos com o estado da arte.
2. Proposta de um algoritmo genérico inédito para resolver o DVRPTW, o qual foi utilizado como modelo para desenvolvimento de seis novos algoritmos.
3. Contribuição ao estado da arte do DVRPTW por serem encontrados resultados com menores percentuais de clientes não atendidos do que todas as abordagens propostas na literatura e com distância total média apenas 5,92% maior do que a abordagem proposta por Pillac et al. (2012).
4. Publicação do número de veículos médio por classe de instância e grau de dinamismo das soluções obtidas através dos seis algoritmos propostos para o DVRPTW, informações que não têm sido publicadas pelos autores.
5. Desenvolvimento de *framework* em Java para solução do TSP, VRP, VRPTW, DVRPTW e que é totalmente extensível para o desenvolvimento de outras versões do problema de roteirização.

## 5.2 Recomendações

Os algoritmos propostos podem ser aprimorados através do tratamento de outras versões do problema de roteirização, como por exemplo, coletas e entregas simultâneas, janelas de tempo flexíveis, retorno ao depósito no mesmo dia de operação, frota heterogenia, múltiplos depósitos, tempos de viagem variáveis, múltiplos entregadores, além de diversas outras versões reportadas na literatura.

O algoritmo MACS-RVND ainda pode ser melhorado em diversos aspectos: aplicação de procedimentos de destruição e reconstrução, assim como é realizado no LNS, visando reduzir o número de veículos; determinação da melhor sequência de aplicação das vizinhanças ao invés de utilizar uma sequência que é definida aleatoriamente; adicionar novas vizinhanças e eliminar as vizinhanças que não fornecem melhorias significativas; deixar de utilizar parâmetros com valores fixos e utilizar parâmetros adaptativos, que podem ser modificados durante a execução do algoritmo de acordo com os dados de cada instância.

A linguagem de programação utilizada para implementação dos algoritmos pode ser trocada por uma linguagem de baixo nível como C ou Fortran e estruturas de dados mais eficientes podem ser utilizadas para que seja possível reduzir o tempo de execução.

Quanto aos testes computacionais, sugere-se a utilização de instâncias do VRPTW maiores, como por exemplo, as instâncias de Homberger e Gehring (1999) que são extensões das instâncias de Solomon (1987) com 200, 400, 800 e 100 clientes. Sugere-se ainda que sejam criadas extensões das instâncias de Homberger e Gehring (1999) para o DVRPTW com os mesmos graus de dinamismos propostos por Lackner (2004) para realização de testes com os algoritmos propostos.