

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS**

Dmoutier Pinheiro Aragão Junior

**COLABORAÇÃO EM SISTEMAS MULTIAGENTES NA  
ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS:  
UM MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS  
EM EMPRESAS OEM**

Florianópolis

2014



Dmoutier Pinheiro Aragão Junior

**COLABORAÇÃO EM SISTEMAS MULTIAGENTES NA  
ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS: UM  
MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS EM  
EMPRESAS OEM**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Doutor em Engenharia de Produção”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, 22 de Abril 2014.

---

Profa., Dra. Lucila Maria de Souza Campos  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Antônio Galvão Naclério Novaes  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientador

---

Profa. Mônica Maria Mendes Luna  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Sergio Fernando Mayerle  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Ricardo José Rabelo  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Orlando Fontes Lima Jr.  
Universidade Estadual de Campinas

---

Prof. Edson Tadeu Bez  
Universidade do Vale do Itajaí







## AGRADECIMENTOS

Por este momento tão especial, gostaria de agradecer à Deus, que reservou este dia para que esta etapa fosse finalizada. E não apenas pelo fato de ser 22 de abril, dia do descobrimento do Brasil, mas também pelo fato de ser logo após o período de páscoa, onde celebra-se a passagem do povo hebreu pelo Mar Vermelho. Após tantas dificuldades e noites afim, ao finalizar a “minha travessia” — que foi este doutorado— posso dizer como Samuel “... até aqui nos ajudou o Senhor (1 Samuel 7:12)”.

Agradeço à Patrícia, minha querida esposa, pela presença constante e dedicação; e à minha filha Esther, fonte de inspiração e alegria; ambas sempre tão presentes e atenciosas durante toda caminhada.

Aos meus pais e irmãos, pelos ensinamentos que me transmitiram (e ainda transmitem), valores tão importantes e fundamentais que guardarei comigo para toda minha vida.

Ao prof. Antônio Galvão Novaes e à profa. Mônica Maria Mendes Luna, por sua orientação, confiança e, paciência durante a realização deste trabalho. Vocês foram professores excelentes!

Aos amigos do Núcleo de Redes de Suprimentos, que estiveram juntos comigo diariamente; em especial a Carolina Vieira, pela parceria e pelos preciosos dias na revisão deste documento.

Não poderia esquecer de toda a equipe da secretaria, citando em especial a tão querida Meri, que como ninguém, se dedica ao sucesso de todos os pós-graduandos.

Aos irmãos da Segunda Igreja Batista em Florianópolis, que com amor receberam a minha família e estão em nossos corações. Creio que estaremos juntos em muitos outros momentos.

À Consuelo, Monalisa e Linda, que me acompanhavam durante as noites, queridas gatinhas companheiras e fiéis no labor noturno. E aos outros bichos que me davam energia extra, como: red bull, blue falcon, etc...

E por fim, ao CNPQ, pela provisão dos recursos financeiros que viabilizaram a minha estadia em Florianópolis e dedicação integral aos estudos.



*It's not about what it is,  
it's about what it can become.*

Dr. Seuss, The Lorax



## RESUMO

O gerenciamento integrado dos processos de transporte é um campo promissor para o uso de agentes, uma vez que a distribuição geográfica dos envolvidos e a existência de diferentes decisores são características inerentes desses processos. Tais agentes, atuando conjuntamente, podem ser vistos como um sistema multiagentes (MAS) que permite aos veículos lidar com novas informações percebidas durante a operação das rotas. A esse tipo de problema, onde as informações utilizadas para o planejamento das rotas mudam durante a operação, chama-se problema de roteirização dinâmica de veículos (DVRP). Os trabalhos que aplicam agentes a DVRP comumente dedicam-se ao tratamento de novas demandas, desconhecidas durante o planejamento das rotas; entretanto, ignoram outras questões dinâmicas que podem estar envolvidas nessas operações, como a existência de congestionamentos e a remoção de tarefas no roteiro. A presente pesquisa propõe um método para avaliar estratégias de colaboração em sistemas multiagentes para DVRP, de maneira que os veículos envolvidos são capazes de tratar, de modo autônomo, a ocorrência de eventos não planejados em suas operações. Para isto, foram estudados os processos logísticos relacionados com empresas montadoras. Nesta modelagem, foram utilizados métodos heurísticos para roteirização de veículos, permitindo assim, que os agentes utilizassem tais métodos a fim de resolver conflitos durante a operação das rotas. A modelagem e o desenvolvimento da ferramenta multiagentes viabilizou a avaliação da colaboração entre agentes nas operações de coleta de componentes para uma empresa montadora. Com isto, foram simulados diferentes experimentos a fim de avaliar algumas estratégias em cenários específicos. Os resultados obtidos permitiram verificar que o método proposto serve para avaliar diferentes estratégias de colaboração. Dentre outras coisas, percebeu-se ainda que a utilização de veículos auxiliares pode melhorar o nível de serviço prestado e, que o seu dimensionamento depende diretamente da demanda inicialmente atribuída.

**Palavras-chave:** Colaboração. Sistemas multiagentes. DVRP. Logística dinâmica



## ABSTRACT

The management of transportation is a promising field for the agent-based approach, once the geographical distribution and the presence of different decision makers are inherent characteristics of these activities. Such agents, acting together, can be seen as a multi-agent system (MAS) that enables vehicles to handle new information perceived after the start of the routes. These issues are known in the literature as Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP). The works in this field usually focus on the processing of new demands, unknown during the planning of routes; however, ignore other dynamic issues that may affect the route accomplishment, as the presence of traffic congestion and the removal of tasks from route. This work propose a method to evaluate collaboration strategies for DVRP using MAS, by this way, vehicles involved are able to deal the occurrence of unplanned events autonomously. So, were studied the logistics processes related with companies assemblers, different heuristics for vehicle routing and how agents can make use of such methods in order to solve conflicts in the operations. After that, the modelling and the development of multi-agent tool were made; this allowed the simulation of collaborative strategies among agents in the operations of components collection for an assembler company. Finally, some experiments were simulated to evaluate some strategies in different contexts. The results obtained proved that the proposed method achieve the objectives of evaluate collaboration strategies. Among other conclusions, were perceived that the fleet sizing depends directly of the initial demand and which these strategies could improve the service level.

**Keywords:** Collaboration. Multiagent systems. DVRP. Logistic Dynamics



## LISTA DE FIGURAS

1	Desenvolvimento do trabalho e relação entre capítulos. . .	31
2	Relacionamento entre a evolução da logística e dos sistemas de informação. . . . .	34
3	Fluxos presentes na logística. . . . .	36
4	Impacto da terceirização nos fluxos transacionais e materiais. . . . .	38
5	Organização SCOR de uma cadeia de suprimentos. . . .	40
6	Possíveis recombinações de nós no método 3-opt. . . . .	58
7	Estruturas de controle. . . . .	73
8	Diagrama de transição de estados de uma rede de contratos. . . . .	78
9	Fluxo de mecanismo de sincronização conservadora implementado. . . . .	84
10	Método proposto para avaliação de estratégias de colaboração. . . . .	88
11	Processo distribuído de tomada de decisão em um problema de coleta. . . . .	90
12	Exemplo dos deslocamentos iniciais dos veículos auxiliares. . . . .	93
13	Exemplo de seleção de tarefas para transferência de acordo com o operador de exclusão. . . . .	96
14	Diagrama de objetivos da metodologia Prometheus. . . .	99
15	Diagrama de cenários da metodologia Prometheus. . . .	100
16	Diagrama de análise da metodologia Prometheus. . . . .	101
17	Diagrama de papéis da metodologia Prometheus. . . . .	102
18	Diagrama de agrupamento de papéis da metodologia Prometheus. . . . .	103
19	Diagrama de acoplamento de dados da metodologia Prometheus. . . . .	103
20	Modelagem de distritos pela configuração <i>wedge-shape</i> . . .	104
21	Distritos gerados pela configuração <i>wedge-shape</i> . . . . .	104
22	Estrutura de agentes proposta para roteirização dinâmica de veículos. . . . .	106
26	Tela de gerenciamento de rotas. . . . .	112
27	Tela de gerenciamento de visitas realizadas. . . . .	112
28	Opções de customização dos gráficos obtidos com a ferramenta. . . . .	113
29	Exemplo de gráfico obtido na ferramenta. . . . .	114

23	Operação de um ciclo de simulação. . . . .	116
24	Modelagem do banco de dados. . . . .	117
25	Tela de gerenciamento de simulações. . . . .	117
30	Cenários simulados. . . . .	120
31	Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 1. . . . .	123
32	Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 2. . . . .	125
33	Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 3. . . . .	128
34	Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 4. . . . .	130
35	Infraestrutura de comunicação entre entidades envolvidas nas operações. . . . .	136
36	Histogramas do número de tarefas não realizadas em todos os cenários para um experimento do tipo 5 (sem veículos auxiliares). . . . .	139
37	Histogramas do número de tarefas não realizadas em todos os cenários para um experimento do tipo 12 (com 7 veículos auxiliares). . . . .	140
38	Exemplo de um roteiro alterado pelas negociações que aumenta a distância percorrida sem aumentar o número de tarefas realizadas. . . . .	141
39	Exemplo de histograma com a frequência de congestionamentos por intervalo de tempo em um experimento com 1000 ciclos. . . . .	142
40	Histograma com a frequência de tempos de conclusão de rota dos veículos próprios. . . . .	142
41	Histograma com a frequência de tempos de conclusão de rota dos veículos auxiliares. . . . .	143
42	Modelagem de classes auxiliares utilizadas pelos agentes. . . . .	174
43	Modelagem dos agentes transportadores. . . . .	175
44	Modelagem dos agentes veículos. . . . .	176
45	Diagrama de estados. . . . .	177

## LISTA DE QUADROS

1	Estruturação do modelo SCOR. . . . .	39
2	Descrição dos processos SCOR para fornecimento na produção puxada. . . . .	43
3	Definição dos processos SCOR para fabricação na produção puxada. . . . .	44
4	Definição dos processos SCOR para entrega na produção puxada. . . . .	45
5	Exemplos de incidentes citados pela literatura. . . . .	47
6	Principais extensões da plataforma Jade. . . . .	81
7	Principais indicadores de desempenho SCOR relacionados com a produção puxada. . . . .	98
8	Estrutura de agentes. . . . .	107
9	Número de simulações executadas. . . . .	119



## LISTA DE TABELAS

1	Número de simulações executadas. . . . .	121
2	Definição de parâmetros para análise financeira dos ex- perimentos. . . . .	121
3	Resultados do cenário 1. . . . .	124
4	Resultados do cenário 2. . . . .	126
5	Resultados do cenário 3. . . . .	129
6	Resultados do cenário 4. . . . .	131



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Activity Based Costing.....
AHP	Analytic Hierarchy Process.....
API	Application Programming Interface.....
APS	Advanced Planning System.....
ASC	Adaptive Supply Chains.....
AUML	Agent Unified Modeling Language.....
B2B	Business-to-Business.....
B2C	Business-to-Consumer.....
B2G	Business-to-Government.....
CPP	Chinese Postman Problem.....
CRM	Customer relationship management.....
DAML	DARPA Agent Markup Language.....
DBMS	Database Management System.....
DAI	Distributed Artificial Intelligence.....
DSL A	Dynamic Service Level Agreement.....
DSS	Decision Support System.....
DVRP	Dynamic Vehicle Routing Problem.....
EDI	Electronic Data Interchange.....
EMS	Enterprise Messaging System.....
ERP	Enterprise Resource Planning.....
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents.....
GPL	General Public License.....
GPS	Global Positioning System.....
HTTP	Hypertext Transfer Protocol.....
ITS	Intelligent Transport Systems.....
JADE	Java Agent Development Framework.....
LGPL	Lesser General Public License.....
LIS	Logistical Information Systems.....
MABS	Multi-agent-Based Simulation.....
MAS	Multi-agent Systems.....
OEM	Original Equipment Manufacturer.....
PSL	Prestadores de Serviços Logísticos.....

SCM	Supply Chain Management.....
SCC	Supply Chain Council.....
SCMS	Supply Chain Management Systems.....
SCOR	Supply Chain Operations Reference.....
SPRT	Sequential Probability Ratio Test.....
SVRP	Stochastic Vehicle Routing Problems.....
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação.....
TSP	Travel Salesman Problem.....
TSPST	Travel Salesman Problem with Stochastic Travel Times
XML	Extensible Markup Language.....
UML	Unified Modeling Language.....
VMI	Vendor Managed Inventory.....
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows.....
VRP	Vehicle Routing Problem.....
W3C	World Wide Web Consortium.....
WMS	Warehouse Management Systems.....
WSDL	Web Services Description Language.....

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
1.1	Definição do problema . . . . .	27
1.2	Objetivo . . . . .	28
1.2.1	Objetivo geral . . . . .	28
1.2.2	Objetivos específicos . . . . .	28
1.3	Ineditismo . . . . .	29
1.4	Metodologia e organização do trabalho . . . . .	29
<b>2</b>	<b>OPERAÇÕES LOGÍSTICAS</b>	<b>33</b>
2.1	Fluxos logísticos . . . . .	35
2.2	Processos logísticos . . . . .	38
2.3	Operações de empresas OEM . . . . .	41
2.3.1	Processos de fornecimento para montagem puxada ( $S_3$ ) . . . . .	42
2.3.2	Processos de fabricação na montagem puxada ( $M_2$ e $M_3$ ) . . . . .	43
2.3.3	Processos de entrega na montagem puxada ( $D_3$ ) . . . . .	44
2.4	Operações dinâmicas . . . . .	46
<b>3</b>	<b>ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS</b>	<b>49</b>
3.1	Problema de roteirização de veículos . . . . .	49
3.2	Roteirização dinâmica de veículos . . . . .	53
3.3	Métodos de solução . . . . .	55
3.3.1	Métodos exatos . . . . .	55
3.3.2	Métodos heurísticos de construção . . . . .	56
3.3.3	Métodos heurísticos de melhoria . . . . .	58
3.3.4	Métodos compostos . . . . .	59
3.3.5	Métodos meta-heurísticos . . . . .	60
3.4	Deteção de congestionamentos . . . . .	63
<b>4</b>	<b>SISTEMAS MULTIAGENTES</b>	<b>69</b>
4.1	Estruturas de controle . . . . .	72
4.2	Mecanismos de negociação . . . . .	73
4.3	Ferramentas multiagentes . . . . .	79
4.4	Simulação de sistemas multiagentes . . . . .	82
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>85</b>

5.1	Revisão da literatura . . . . .	85
5.2	Proposição do método . . . . .	88
5.3	Modelagem de aplicação em empresas OEM . . . . .	90
5.3.1	Métodos heurísticos . . . . .	91
5.3.2	Estratégias de colaboração . . . . .	92
5.3.2.1	Utilização de veículos auxiliares . . . . .	92
5.3.2.2	Negociação entre veículos . . . . .	92
5.3.3	Indicadores de desempenho . . . . .	98
5.3.4	Modelagem do MAS . . . . .	98
5.3.5	Definição de região de atuação . . . . .	101
5.4	Implementação do modelo . . . . .	105
5.4.1	Estrutura de agentes . . . . .	106
5.4.2	Banco de dados . . . . .	108
5.4.3	Implementação do MAS . . . . .	109
5.4.4	Sistema de gerenciamento dos resultados . . . . .	111
5.4.5	Parâmetros utilizados . . . . .	114
5.5	Simulação . . . . .	118
5.6	Resultados da simulação . . . . .	120
5.6.1	Cenário 1 — Sem sobrecarga de tarefas e Sem participação de veículos próprios na negociação .	121
5.6.2	Cenário 2 — Com sobrecarga de tarefas e Sem participação de veículos próprios na negociação .	125
5.6.3	Cenário 3 — Sem sobrecarga de tarefas e Com participação de veículos próprios na negociação .	127
5.6.4	Cenário 4 — Com sobrecarga de tarefas e Com participação de veículos próprios na negociação .	130
<b>6</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>133</b>
6.1	Modelagem do problema . . . . .	133
6.2	Implementação do modelo . . . . .	135
6.3	Experimentos e cenários simulados . . . . .	137
6.4	Resultados da simulação . . . . .	138
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>145</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>149</b>
	<b>APÊNDICE A – Descrição de códigos de categorias de processos e processos do modelo SCOR</b>	<b>163</b>
	<b>APÊNDICE B – Descrição técnica do MAS desenvolvido</b>	<b>173</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) têm viabilizado a troca mais intensiva de informações a baixo custo entre empresas parceiras, permitindo a melhoria do desempenho empresarial (KWON; IM; LEE, 2008). O custo de aquisição dessas TIC vem sendo reduzido ao longo do tempo, facilitando a adoção destas tecnologias pelas pessoas e organizações. Isso contribuiu para que muitas empresas se organizassem em cadeias de suprimento (o gerenciamento dessas é conhecido como *Supply Chain Management* — SCM), como uma prioridade estratégica para o negócio (KWON; IM; LEE, 2008). Frohlich (2002) afirma que, em geral, a integração na cadeia de suprimentos melhora os resultados e provê vantagens competitivas para as empresas da cadeia. Assim, novos negócios têm sido viabilizados pelo crescimento das redes de comunicações, facilitando o acesso às informações e minimizando o impacto da dispersão dos membros da cadeia de suprimentos (SOROOR; TAROKH; SHEMSHADI, 2009).

Como constatado por Novaes (2007), a disponibilidade de tecnologias há muito deixou de ser um problema. Dezenas de soluções, como é o caso dos softwares de roteirização, estão disponíveis no mercado; mas ainda observa-se uma baixa taxa de adoção dessas ferramentas. Adler e Blue (2002) observam que o crescimento das TIC viabiliza o uso de equipamentos embarcados nos veículos, permitindo: orientação de rota para evitar o congestionamento, comunicação com o motorista, e comunicação dos contratantes diretamente com os veículos. Todavia, sem gerenciar adequadamente seus recursos mais importantes, frota e pessoal, empresas especializadas em atividades de transporte de cargas correm o risco de perder eficiência e competitividade. Deste modo, é preciso fomentar o uso de sistemas inteligentes de transportes (*Intelligent Transportation Systems* — ITS), capazes de lidar adequadamente com os aspectos dinâmicos inerentes da logística (ADLER; BLUE, 2002).

Leitao (2009) concluiu que o ambiente dinâmico em que as empresas operam, onde alterações na economia, novas tecnologias e tendências de consumo mudam rapidamente, requer das empresas agilidade e flexibilidade para lidar com situações críticas inesperadas. Estes novos requisitos propiciaram o surgimento de sistemas de controle distribuídos e inteligentes, provendo a adaptabilidade e a agilidade requerida pelas empresas. Nesse contexto, o conceito de agentes apresenta-se promissor no que diz respeito ao tratamento autônomo dessas situações críticas. Abordagens baseadas em agentes são adequadas para o geren-

ciamento da atividade logística de transporte e pode-se identificar inúmeros estudos nesse tema (FOX; BARBUCEANU; TEIGEN, 2000; JULKA; SRINIVASAN; KARIMI, 2002; KARAGEORGOS et al., 2003; DAVIDSSON et al., 2005; ROORDA et al., 2010; VOKRINEK; KOMENDA; PECHOUCEK, 2010; MACIEJEWSKI; NAGEL, 2012).

Em geral, cadeias de suprimentos são sistemas complexos onde estão envolvidos diferentes aspectos dinâmicos, estocásticos e incertos; tais características tornam a simulação, em especial a simulação baseada em agentes, uma das mais efetivas ferramentas para modelar as cadeias de suprimentos (LONG; LIN; SUN, 2011). Entretanto, a maior parte das abordagens baseadas em agentes observadas na literatura não consideram tais aspectos (WANG et al., 2008), especialmente aquelas presentes em ambientes operacionais de transporte de cargas.

Para a solução destes problemas comumente recorre-se ao uso de heurísticas — técnicas de resolução de problemas que não garantem a solução ótima, mas que alcançam bons resultados em menor tempo computacional, se comparadas com modelos que buscam a solução ótima. Pode-se perceber que, em geral, modelagens que resultam em soluções ótimas possuem sérias limitações que restringem a sua adoção: requerem um alto volume de informação *a priori*, são sensíveis à variação da informação e, o tempo requerido para encontrar a solução ótima é, em geral, muito elevado (MES; HEIJDEN; HARTEN, 2007).

O uso de heurísticas para solucionar problemas dinâmicos de transportes, em conjunto com a abordagem de agentes, pode permitir que se lide com as restrições que caracterizam os problemas desta natureza, como: tamanho da frota, capacidade dos veículos, disponibilidade da tripulação, necessidade de ajustes na rota planejada, terceirização das atividades de transportes, identificação de eventos não planejados (quebras de veículos, congestionamentos, erros de percurso, etc), dentre outras questões relevantes no gerenciamento de transportes.

Assim, neste trabalho é apresentado um método para avaliar estratégias de colaboração em sistemas multiagentes para resolver um problema de roteirização dinâmica de veículos. Onde uma estratégia pode ser definida como uma composição de definições no modelo a ser simulado, como: número de veículos auxiliares utilizados, e técnica de negociação entre veículos. A avaliação das estratégias propostas nesta tese considera o contexto de uma indústria montadora (ou *Original Equipment Manufacturer* — OEM), onde operadores logísticos são utilizados para realizar coletas em diferentes fornecedores e entregar os componentes coletados no depósito da indústria montadora.

## 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os processos de transporte de cargas são realizados de modo geograficamente distribuídos na medida em que transportadoras, clientes, veículos e outros decisores estão dispersos na rede. Esta configuração dificulta o gerenciamento desses processos, principalmente ao se considerar os incidentes que podem afetar a realização das atividades de transporte. Tais incidentes são considerados eventos presentes na realização do serviço, mas não previstos no planejamento (LARSEN; MADSEN; SOLOMON, 2008). Assim, gerenciar adequadamente os incidentes nestes processos é tarefa complexa, pois cada um dos atores envolvidos possui seus próprios interesses, implicando em diferentes recursos e restrições associadas.

É sabido que os métodos de otimização aplicáveis aos problemas convencionais de roteirização, normalmente, não são adequados para tratar as mudanças percebidas durante a realização do roteiro. Para abordar estas questões, uma classe de problemas, conhecida como Problemas de Roteirização Dinâmica de Veículos (ou Dynamic Vehicle Routing Problem — DVRP), tem sido estudada. Os DVRP permitem lidar com incidentes durante a operação e, assim, requerem um tempo de resposta quase que imediato para realizar intervenções durante a realização de uma rota. Para isto, frequentemente fazem uso de heurísticas para obtenção de soluções satisfatórias com um tempo computacional razoável, bem menor que o necessário para soluções ótimas.

O uso de agentes na roteirização de veículos torna possível lidar com incidentes que possam surgir durante as operações, por exemplo, criando e ajustando rotas durante a realização das tarefas. Entretanto, Davidsson et al. (2005) observam que o uso de agentes na tomada de decisão estratégica em transporte de cargas é uma área pouco estudada. Os autores afirmam ainda que as aplicações de agentes neste campo de pesquisa possuem baixo grau de maturidade; isto é, os modelos identificados estão distantes de serem utilizados operacionalmente em empresas.

Neste trabalho foram avaliadas estratégias de colaboração em sistemas multiagentes para resolver um problema de roteirização dinâmica de veículos no contexto de uma indústria montadora (ou *Original Equipment Manufacturer* — OEM), onde são utilizados operadores logísticos para realizar coletas em diferentes fornecedores e entregar os componentes coletados no depósito da indústria montadora.

Assim, o método deve indicar quais estratégias são mais interessantes em diferentes cenários. As estratégias consideradas, devidamente

descritas na seção 5.3.2, foram definidas a partir da utilização de um determinado número de veículos auxiliares e de técnicas de negociação de tarefas entre veículos. Tais estratégias foram avaliadas em diferentes cenários, utilizando diferentes quantidades de tarefas inicialmente atribuídas aos veículos próprios e a participação, ou não, dos veículos próprios no processo de negociação.

Assim, o uso destas estratégias deve contribuir para a redução do número de tarefas não atendidas, reproduzindo uma situação onde é requerido um alto nível de serviço; isto é, onde a não realização das tarefas é algo indesejável. Se observados os custos fixos e variáveis decorrentes da operação dos veículos, tem-se que um objetivo indireto deste problema está na redução da frota utilizada. Isto decorre do fato de que quanto menor for a frota, menores serão os custos fixos e de operação da mesma. Assim, novos veículos apenas serão adicionados se houver um volume de utilização que justifique o custo fixo adicional.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um método de avaliação de estratégias de colaboração utilizando sistemas multiagentes na roteirização dinâmica de veículos, levando em consideração indicadores de custo e nível de serviço.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar e selecionar métodos de otimização e heurísticas aplicáveis aos problemas de roteirização dinâmica de veículos;
- Identificar e propor estratégias de colaboração entre agentes utilizados para apoiar operações logísticas;
- Determinar indicadores de desempenho relacionados às atividades de roteirização;
- Desenvolver um modelo de sistema multiagentes (MAS) que permita simular a roteirização dinâmica de veículos no contexto de uma empresa OEM;
- Avaliar algumas estratégias de colaboração utilizando o modelo proposto.

### 1.3 INEDITISMO

Os estudos identificados na literatura, que fazem uso de agentes na roteirização dinâmica de veículos tratam, em geral, de novas demandas a serem alocadas durante a realização do roteiro (como em Zeddini et al. (2008), Vokrinek, Komenda e Pechoucek (2010) e Maciejewski e Nagel (2012)). Estes trabalhos propõem abordagens para lidar com a inclusão de novas tarefas não programadas *a priori*, as quais não consideram a colaboração entre veículos no tratamento de eventos não planejados, tais como a ocorrência de congestionamentos, inclusão de novas tarefas, etc.

O presente trabalho propõe um modelo para avaliar estratégias de colaboração em sistemas multiagentes na roteirização dinâmica de veículos. Este modelo faz uso da Análise Sequencial (ou *Sequential Probability Ratio Test* — SPRT) para identificar a existência de congestionamentos durante a operação, e permite que os agentes possam reagir prontamente com base nas velocidades observadas.

A análise da literatura também permite observar que as aplicações de MAS usualmente focam a atividade produtiva, enquanto as questões relacionadas aos transportes são simplificadas ou ignoradas. Este trabalho trata das tarefas de transportes, permitindo que os agentes tenham autonomia para reverem suas rotas a qualquer momento. Assim, o roteiro inicialmente planejado é ajustado de acordo com os eventos percebidos ao longo das operações, de modo buscar atender as limitações de tempo disponível.

No que diz respeito às estratégias analisadas neste trabalho, pode-se destacar aquela que trata da utilização de veículos auxiliares. Estes são empregados nos casos em que a demanda da empresa varia de tal modo que a frota própria é insuficiente para realizar todas as atividades de transporte mas, ao mesmo tempo, não se justifica realizar investimentos em frota. Desta maneira, veículos auxiliares podem ser contratados para realizar tarefas excedentes das rotas inicialmente planejadas.

### 1.4 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizado o método de pesquisa de modelagem e simulação, conforme definido por Martins (2012), com o qual é possível manipular diferentes variáveis do modelo a fim de compreender seu comportamento. Segundo Morabito

Neto e Pureza (2012), os modelos de simulação podem ser descritos como modelos quantitativos abstratos que fazem uso de técnicas analíticas (ferramentas matemáticas e estatísticas) e experimentais (simulação) para compreender o sistema que está sendo modelado. Os autores afirmam ainda que tais modelos costumam ser abstratos por representarem a realidade, e quantitativos por levarem em consideração apenas variáveis que possam ser mensuradas. Assim, as manipulações das variáveis quantitativas foram realizadas apenas sobre o modelo conceitual e não sobre a realidade, e através dos experimentos de simulação, puderam ser avaliadas diferentes estratégias de colaboração.

Por outro lado, segundo a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), esta pesquisa pode também ser classificada como axiomática quantitativa e normativa. Segundo Morabito Neto e Pureza (2012), as pesquisas axiomáticas quantitativas são inicialmente dirigidas a problemas idealizados, de maneira que se espera compreender o funcionamento de determinadas variáveis do modelo baseando-se em premissas sobre o comportamento de outras variáveis. Durante o desenvolvimento deste trabalho observou-se um número elevado de variáveis envolvidas; optou-se então por fixar algumas características do modelo a fim de conter o crescimento da quantidade de experimentos a serem realizados. Por fim, ao ser caracterizada como normativa, avalia a utilização de diferentes estratégias no problema de roteirização dinâmica de veículos, sugerindo aquelas mais adequadas a determinadas situações.

Esta tese está estruturada em 7 (sete) capítulos, os primeiros capítulos tratam da revisão de literatura realizada sobre os temas de Operações Logísticas (Capítulo 2), Roteirização de Veículos (Capítulo 3) e Sistemas Multiagentes (Capítulo 4). Inicialmente são apresentados os diferentes processos logísticos, ressaltando como esses impactam nos fluxos envolvidos e destacando as operações relacionadas com as empresas OEM. Em seguida, são abordados os métodos de solução exatas, heurísticas e meta-heurísticas que têm sido propostos para problemas de roteirização, apontando os projetos recentes desenvolvidos neste campo. Por fim, apresenta-se o conceito de sistemas multiagentes, destacando as diferentes estruturas de controle que podem ser utilizadas, os tipos de acordos que podem ser realizados entre os agentes e as principais ferramentas disponíveis que podem ser utilizadas para a simulação baseada em agentes.

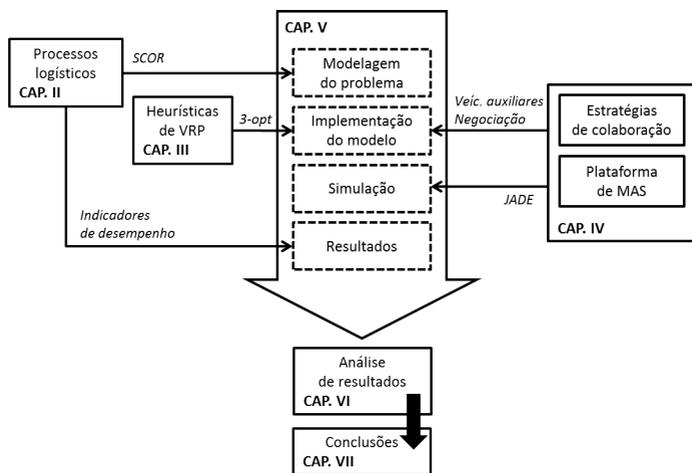
Por sua vez, os Procedimentos Metodológicos abordam a modelagem realizada, a implementação do modelo e os experimentos realizados (Capítulo 5). Ainda neste capítulo foram descritas, dentre outras coisas, as estratégias de colaboração avaliadas, as heurísticas para ro-

teirização utilizadas pelos agentes, os indicadores de desempenho, a estrutura de agentes, e os principais parâmetros do modelo.

As Análises e Discussões dos Resultados (Capítulo 6) descrevem os resultados obtidos nos experimentos em cada cenário avaliado. Finalmente, as Conclusões e Recomendações (Capítulo 7) trazem as principais considerações obtidas a partir dos resultados deste trabalho.

A figura 1 apresenta um esquema do trabalho desenvolvido, destacando as etapas do procedimento metodológico e os principais resultados dos outros capítulos que foram utilizados dentro do método. Os resultados obtidos no procedimento metodológico subsidiam as etapas de análise de resultados e as conclusões.

Figura 1 – Desenvolvimento do trabalho e relação entre capítulos.



Fonte: Elaborada pelo autor.



## 2 OPERAÇÕES LOGÍSTICAS

Para que operações logísticas sejam gerenciadas de modo autônomo, é interessante primeiramente entender como essas operações costumam ser realizadas. Segundo Novaes (2007), empresas modernas têm deixado de realizar seus processos produtivos de maneira verticalmente integrada, cada vez mais delegando partes destes a outras empresas fornecedoras. Uma prática comum observada em diversas empresas consiste na contratação de operadores logísticos para assumir atividades logísticas (REGAN; SONG, 2001; LUNA; FRIES; ARAGÃO JR, 2011). Esta terceirização dos serviços logísticos permite que a indústria possa concentrar esforços em sua atividade principal.

Quando as empresas colaboram para posicionar-se estrategicamente e aperfeiçoar sua eficiência operacional, configura-se a existência de uma cadeia de suprimentos (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2002). Fox, Barbuceanu e Teigen (2000) ressaltam que diferentes atores podem compor uma cadeia, como: fornecedores, fábricas, subcontratantes, armazéns, centros de distribuição e varejistas. Neste contexto, a crescente exigência de qualidade e de elevado nível de serviço têm feito com que muitas cadeias deixassem a abordagem da eficiência produtiva, onde busca-se produzir mais com menos insumos, para abordagens orientadas aos clientes e sincronizadas com parceiros (WANG et al., 2008).

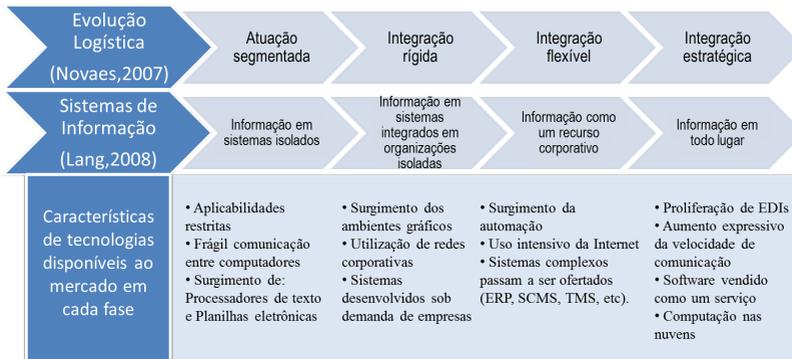
Ao buscar ganhos de desempenho, o gerenciamento da cadeia de suprimentos (ou *Supply Chain Management* — SCM) impacta diretamente no sucesso dos negócios em ambiente empresarial altamente competitivo (JULKA; SRINIVASAN; KARIMI, 2002), através da coordenação, agilidade e sincronização entre os atores da cadeia (LEE, 2002; FORGET; D'AMOURS; FRAYRET, 2008). Neste sentido, sistemas de informação para a comunicação entre as empresas que compõe uma cadeia de suprimentos são críticos para a manutenção de um ambiente integrado (LEE, 2002; NOVAES, 2007).

O uso de sistemas de informação no gerenciamento integrado da cadeia de suprimentos tem crescido em importância. Lang et al. (2008) classificam a evolução desses sistemas em 4 (quatro) etapas: *i*) informação em sistemas isolados; *ii*) informação em sistemas integrados, mas em organizações isoladas; *iii*) informação como um recurso corporativo; e *iv*) informação disponível em todo lugar. Novaes (2007) criou uma classificação da atuação das empresas de acordo com o nível de integração logística, o qual chamou de evolução integrativa. As seguintes fases da integração logística foram identificadas: *i*) segmentada, onde

existe grande preocupação da redução dos custos logísticos, mesmo em detrimento do restante da cadeia de suprimento; *ii*) rígida, na qual as empresas atentam para a otimização e planejamento da logística, mas de modo rígido; *iii*) flexível, caracterizada pela integração dinâmica e flexível na cadeia de suprimento; e *iv*) e estratégica, situação em que empresas passam a utilizar logística de modo estratégico dentro da cadeia de suprimentos.

Um paralelo entre as classificações de Novaes (2007) e Lang et al. (2008) é apresentado na figura 2, onde se pode verificar que a integração logística evoluiu juntamente com o desenvolvimento dos sistemas de informação (ARAGÃO JR et al., 2011). Os autores ainda apresentam características importantes das tecnologias em cada nível de evolução.

Figura 2 – Relacionamento entre a evolução da logística e dos sistemas de informação.



Fonte: ARAGÃO JR et al. (2011).

A necessidade de integração logística consiste num desafio enfrentado pelas empresas no atual contexto, uma vez que bons sistemas de informação raramente funcionam de forma isolada, mas, ao contrário, necessitam de interfaces que viabilizem a interação com outros sistemas. Hohpe e Woolf (2004), citam algumas técnicas que permitem a integração de sistemas de informação; exemplos destas são: troca entre arquivos, compartilhamento de bancos de dados, *Remote Procedure Invocation* (RPI) e troca de mensagens.

Empresas montadoras (ou *Original Equipment Manufacturer* — OEM) normalmente necessitam de uma maior visibilidade na cadeia de suprimento. Embora o conhecimento da disponibilidade das partes

envolvidas no sistema produtivo seja fundamental para a manutenção do fluxo produtivo planejado, isto se torna desafiador quando as responsabilidades estão dispersas em diferentes redes (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2002). A fim de atingir melhores resultados pela especialização de suas atividades, algumas empresas optam por alinhar-se estrategicamente, delegando a produção de partes dos seus produtos a outras empresas. Assim, a empresa que detém a marca do produto final ocupa-se com as atividades de montagem, customização e comercialização dos produtos. As relações de poder nesse tipo de negócio geralmente são desequilibradas, onde as empresas fornecedoras subordinam seus interesses aos da empresa montadora detentora da marca (LIN, 2004).

O objetivo deste capítulo é apresentar os diferentes conceitos relacionados às operações logísticas presentes neste trabalho, subsidiando assim a especificação dos experimentos a serem simulados na seção 5.5. Para isto, foram destacados os fluxos na seção 2.1 e os processos na seção 2.2 envolvidos nas operações logísticas de maneira geral. Um detalhamento das operações de uma empresa OEM é feito na seção 2.3. No fim deste capítulo, a seção 2.4 aborda os eventos dinâmicos que podem estar presentes nas operações de uma empresa OEM.

## 2.1 FLUXOS LOGÍSTICOS

Os fluxos presentes numa cadeia de suprimentos podem ser de quatro tipos diferentes: materiais, transacionais, financeiros e informacionais (TILANUS, 1997; NOVAES, 2007), como mostrado na figura 3. O fluxo material está associado ao transporte de mercadorias na direção de fornecedores aos clientes. Cada indústria precisa ser capaz de gerenciar as matérias primas que chegam de seus fornecedores, administrar o armazenamento destas em seus estoques internos e distribuir os produtos beneficiados para seus clientes. Por sua vez, os fluxos transacionais caracterizam-se pelas transações comerciais e de divulgação entre empresas da cadeia, através dos quais se estabelecem as relações de compra e venda. Uma vez estabelecidas as relações comerciais, existe um fluxo monetário associado com a transferência de recursos financeiros. Os fluxos informacionais se referem às trocas de mensagens entre as empresas durante as suas operações, seguindo nos dois sentidos. A medida que os materiais são transportados, as informações acerca dos materiais e dos recursos envolvidos devem ser avaliadas e gerenciadas na cadeia de suprimentos. Deste modo, os materiais em trânsito po-

dem não apenas ser devidamente rastreados, mas decisões estratégicas podem ser tomadas a fim de minimizar ou prevenir falhas (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2002).

Figura 3 – Fluxos presentes na logística.



Fonte: Adaptado de Novaes (2007).

Uma vez que normalmente não existe uma sequência simples de todos esses fluxos, os sistemas de informação voltados ao SCM devem ser capazes de lidar com as complexidades associadas a essas operações (STADTLER; KILGER, 2008). Assim, os fluxos informacionais devem seguir a dinâmica das operações, contribuindo para que as empresas possam acompanhar a qualquer instante as operações. Hugos (2003) destacou a importância do fluxo de informações, observando que:

O tradicional processo de gerenciamento de pedidos possui maiores prazos de entrega e tempos de espera incorporados devido à lenta transferência de dados à jusante e à montante da cadeia de suprimentos. Esta demorada transferência funciona bem o suficiente em algumas cadeias simples, mas, em cadeias complexas, transferências mais precisas e rápidas são necessárias de forma a atingir a capacidade de resposta e eficiência necessárias. O gerenciamento de pedidos moderno está centrado em técnicas que permitam a transferência mais rápida e precisa dos dados relativos aos pedidos (HUGOS, 2003).

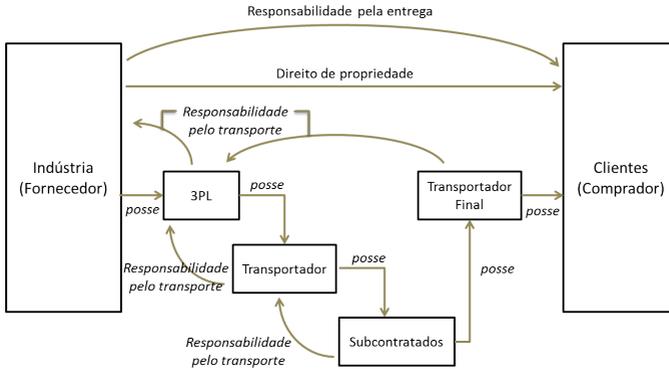
A organização do fluxo de informações entre os sistemas de diferentes entidades tende a possuir maior complexidade que o de materiais. Isso acontece por envolver diferentes sistemas de fornecedores, indústrias, armazéns, e clientes. Uma única transferência de material pode estar associada a múltiplos fluxos informacionais, e cada empresa

pode fazer uso de uma variedade de sistemas de informações no gerenciamento de suas atividades, podendo envolver entidades diferentes como fornecedores de tecnologia, linguagens de programação, bancos de dados, licenciamento, etc. As trocas de informação podem ser realizadas entre sistemas da mesma empresa (fluxos intraempresariais), ou envolvendo sistemas de diferentes empresas (fluxos interempresariais), dependendo de como as operações das empresas são realizadas. Dentre os principais sistemas utilizados na logística que podem estar envolvidos nestas trocas de informações, podem ser citados:

- *Logistical Information System* (LIS) ou Sistema de Informações Logísticas (BOWERSOX; CLOSS, 2001; DORNIER, 2000; ZHANG et al., 2013);
- *Customer Relationship Management* (CRM) ou Gestão de Relacionamento com Clientes (FRAZELLE, 2002; RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2010);
- *Supply Chain Management System* (SCMS) ou Gestão da Cadeia de Suprimentos (RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2010);
- *Enterprise Resource Planning* (ERP) ou Planejamento integrado de recursos (KOKKINAKI et al., 2004; OU-YANG; HON, 2008; RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2010; HALD; MOURITSEN, 2013);
- Serviços de Roteirização e Rastreamento (RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2010; NOVAES, 2007);
- *Warehouse Management System* (WMS) ou Sistema de Gerenciamento de Armazéns (KOKKINAKI et al., 2004; RUSHTON; CROUCHER; BAKER, 2010; ACCORSI; MANZINI; MARANESI, 2014);
- *Transportation Management System* (TMS) ou Sistema de Gerenciamento de Transportes (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2002; VIEIRA; COELHO; LUNA, 2013).

Como apresentado inicialmente, a terceirização das atividades de transporte têm sido uma alternativa frequentemente utilizada pelas indústrias, isto tem influenciado os fluxos de movimentação de transações e de materiais, tornando-os mais complexos. A figura 4 ilustra um arranjo comercial, onde observa-se que a existência de atores intermediários, corresponsáveis pela realização do fluxo de movimentações entre indústria e clientes, exige que estas entidades atuem de maneira integrada a fim de lidar adequadamente com as mercadorias transportadas e as responsabilidades sobre estas (TILANUS, 1997).

Figura 4 – Impacto da terceirização nos fluxos transacionais e materiais.



Fonte: Tilanus (1997).

## 2.2 PROCESSOS LOGÍSTICOS

Para que os processos logísticos possam ser integrados de modo autônomo é necessário que os mesmos sejam conhecidos e estejam devidamente documentados. O modelo de referência *Supply Chain Operations Reference* (SCOR) para operações na cadeias de suprimentos (SCC, 2009), descreve processos, melhores práticas e indicadores de desempenho para cadeias de suprimento. Este modelo foi proposto pelo *Supply Chain Council* (SCC), contando com a participação de centenas de pesquisadores, profissionais e empresas de diversos países do mundo. Diferentes trabalhos têm feito uso deste modelo a fim de investigar processos logísticos, como: Hugos (2003), Favez, Rabelo e Mollaghasemi (2005) e Forget, D'Amours e Frayret (2008).

O modelo SCOR está estruturado em cinco macroprocessos: *plan* (planejamento), *source* (fornecimento), *make* (produção ou agregação de valor), *deliver* (entrega, ou transporte) e *return* (logística reversa). Cada um desses macroprocessos, por sua vez, é formado por categorias, e dentro destas categorias estão descritos os processos e como estes se relacionam. A implementação dos processos não é abordada no modelo, assim como a decomposição dos processos em tarefas, destas tarefas em atividades e dos papéis relacionados à realização destas atividades. O quadro 1 sintetiza a estrutura do modelo SCOR, apresentando a organização dos diferentes níveis de gerenciamento e as respectivas siglas

dos processos relacionados no modelo <sup>1</sup>.

Quadro 1 – Estruturação do modelo SCOR.

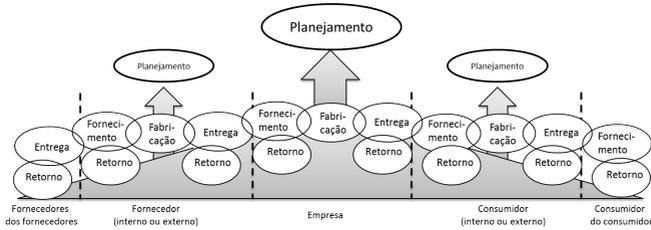
Nível de gerenciamento	Formado por
Macroprocessos ( <i>top level</i> )	Planejamento ( <i>Plan</i> ), Fornecimento ( <i>Source</i> ), Fabricação ( <i>Make</i> ), Entrega ( <i>Deliver</i> ), Retorno ( <i>Return</i> ), e Monitoramento ( <i>Enable</i> )
Categorias de processos ( <i>configuration level</i> )	Planejamento: $P_1 - P_5$ ; Fornecimento: $S_1 - S_3$ ; Fabricação: $M_1 - M_3$ ; Entrega: $D_1 - D_4$ ; Retorno: $SR_1 - SR_3$ ; e $DR_1 - DR_3$ Monitoramento: EP, ES, EM, ED, ER
Processos ( <i>process element level</i> )	Planejamento: $P_{1.1} - P_{1.4}$ ; $P_{2.1} - P_{2.4}$ ; $P_{3.1} - P_{3.4}$ ; $P_{4.1} - P_{4.4}$ ; $P_{5.1} - P_{5.4}$ Fornecimento: $S_{1.1} - S_{1.5}$ ; $S_{2.1} - S_{2.5}$ ; $S_{3.1} - S_{3.7}$ Fabricação: $M_{1.1} - M_{1.7}$ ; $M_{2.1} - M_{2.7}$ ; $M_{3.1} - M_{3.7}$ Entrega: $D_{1.1} - D_{1.15}$ ; $D_{2.1} - D_{2.15}$ ; $D_{3.1} - D_{3.15}$ ; $D_{4.1} - D_{4.7}$ Retorno: $SR_{1.1} - SR_{1.5}$ ; $SR_{2.1} - SR_{2.5}$ ; $SR_{3.1} - SR_{3.5}$ ; $DR_{1.1} - DR_{1.4}$ ; $DR_{2.1} - DR_{2.4}$ ; $DR_{3.1} - DR_{3.4}$ Monitoramento: $EP_1 - EP_{10}$ ; $ES_1 - ES_{10}$ ; $EM_1 - EM_9$ ; $ED_1 - ED_9$ ; $ER_1 - ER_8$
Elementos de processos decompostos ( <i>implementation level</i> )	Tarefas não definidas no modelo SCOR
Tarefas decompostas ( <i>undefined</i> )	Atividades não definidas no modelo SCOR
Papéis para realização das atividades ( <i>undefined</i> )	Papéis não definidos no modelo SCOR

Fonte: Adaptado de Hwang, Lin e Jr (2008).

Como pode ser visualizado na figura 5, que ilustra os processos SCOR, as operações de uma cadeia de suprimentos devem ser realizadas de modo integrado entre os atores da cadeia. Assim, os processos de um elo (uma entidade) conectam-se aos processos de outro elo da cadeia (SCC, 2009). Por exemplo, os processos do macroprocesso “Entrega” de um elo relacionam-se com os processos do macroprocesso “Fornecimento” de outro ator à jusante na cadeia de suprimento. O modelo SCOR identifica as melhores práticas e indicadores de desempenho para a realização dos processos nas operações de cadeias de suprimento.

<sup>1</sup>Os significados dos índices desta tabela podem ser observados no Apêndice A

Figura 5 – Organização SCOR de uma cadeia de suprimentos.



Fonte: SCC (2009).

Os processos de planejamento estão associados com os requisitos determinados e ações corretivas a serem realizadas para se alcançar os objetivos esperados (SCC, 2009). Estes processos são realizados com certa periodicidade, podendo acontecer nos níveis estratégico, tático, ou operacional. No nível estratégico, o planejamento é realizado com tempo suficiente antes da realização do serviço. Nesse nível busca-se alinhar a oferta à demanda, adequar o número de máquinas ou pessoas à produtividade esperada, reduzir níveis globais de estoque, sincronizar transportes de materiais entre empresas, etc. Para o nível tático, o planejamento pode englobar a programação de máquinas, veículos, ou serviços em geral; à programação atribui-se o sequenciamento das atividades, observando o aspecto temporal envolvido na realização destas. Por sua vez, no nível operacional, usualmente não há tempo hábil para se realizar planejamento baseado em soluções ótimas, dado que tais métodos de otimização em geral necessitam de um elevado tempo de computação. Assim, para questões operacionais, é preciso utilizar métodos que permitam a obtenção de soluções no menor tempo possível (MES; HEIJDEN; HARTEN, 2007).

Os processos de fornecimento estão relacionados ao atendimento dos pedidos, entregas, recebimentos e transferência de: matérias primas, produtos manufaturados intermediários, produtos manufaturados acabados e/ou serviços (SCC, 2009). A escolha de fornecedores para a aquisição de matérias primas ou peças intermediárias é fundamental para os negócios das empresas. O menor custo é o aspecto preponderante na decisão sobre a escolha do fornecedor; mas em mercados mais competitivos, o nível de serviço não pode ser desprezado.

A fabricação compreende os processos associados à agregação de valor aos produtos através da manipulação e/ou transformação de

materiais. A agregação de valor comumente acontece dentro das indústrias, onde os materiais são transformados. Outras entidades, como operadores logísticos, podem também realizar serviços que agreguem valor ao produto, *e.g.* separação e consolidação de produtos, empacotamento e movimentação.

A atividade de entrega corresponde à movimentação física das matérias primas, produtos intermediários ou mesmo produtos acabados das indústrias a seus clientes. Algumas empresas têm percebido oportunidades para a redução de custos no transporte.

Por fim, os processos de retorno estão associados aos fluxos reversos de materiais e produtos. Tais fluxos podem acontecer por diferentes motivos, tais como: produto defeituoso em garantia, *recalls*, expiração do prazo de validade, produtos entregues em excesso, resíduos provenientes da utilização do produto, obsolescência, etc. Assim, no retorno, a movimentação de bens segue na direção à montante da cadeia de suprimentos.

### 2.3 OPERAÇÕES DE EMPRESAS OEM

De acordo com Gunasekaran e Ngai (2009), os sistemas de manufatura podem ser classificados como: produção puxada (*make to order*), produção empurrada (*make to stock*), montagem puxada (*engineer to order*), e montagem empurrada (*assemble to stock*). Em um sistema de produção empurrada, a produção é iniciada antes que a demanda ocorra, de maneira que os produtos finalizados passam pelo estoque antes de serem vendidos aos clientes. No sistema de produção puxada, a fabricação é iniciada apenas após a demanda ser conhecida. Dessa maneira os produtos fabricados devem ser entregues diretamente aos clientes, sem a necessidade do seu armazenamento na indústria. A produção puxada é especialmente interessante quando é necessário realizar customizações em massa, onde os clientes fazem pedidos que atendam às suas necessidades específicas (ZHANG et al., 2013). Na montagem puxada, os componentes que serão utilizados em um produto são fabricados antecipadamente à demanda dos clientes, porém a montagem destes apenas se dá após o conhecimento da demanda. A montagem puxada pode ser vista como uma forma de postergação de algumas operações (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2002). Por fim, na montagem empurrada, tanto os componentes utilizados na fabricação quanto os próprios produtos são fabricados e enviados primeiramente ao estoque, antes do recebimento do pedido dos clientes. A montagem empurrada

diferencia-se da produção empurrada por também envolver estoques de componentes de seus fornecedores. Por envolver altos níveis de estoques, a montagem empurrada é um sistema pouco interessante.

Ao analisar as operações de empresas OEM, verifica-se o uso frequente de sistemas de produção puxada, onde a empresa montadora, em geral maior que seus fornecedores, se utiliza da sua posição estratégica para impor condições de fornecimento a seus fornecedores. Deste modo, o sistema de produção “puxada” faz com que a empresa OEM opere com estoques reduzidos.

O modelo SCOR possui 3 (três) processos diretamente relacionados com as operações em um sistema de produção puxada (ARAGÃO JR; NOVAES; LUNA, 2013), sendo estes: fornecimento para montagem puxada (*Source Engineer-to-Order Product* —  $S_3$ ), fabricação para a produção puxada (*Make Make-to-Order* —  $M_2$ ), montagem de produtos finais (*Make Engineer-to-Order* —  $M_3$ ), e entrega na montagem puxada (*Deliver Engineer-to-Order Product* —  $D_3$ ). Estas categorias de processos são descritas nas seções subsequentes. Os demais processos, como planejamento, retorno e monitoramento não foram abordados neste trabalho, pois não relacionam-se com a aplicação realizada no capítulo 5.

### **2.3.1 Processos de fornecimento para montagem puxada ( $S_3$ )**

O processo de fornecimento para montagem puxada envolve as atividades de identificação e seleção de fornecedores, negociação, validação, agendamento, realização de pedido, recebimento de componentes e produção de produtos especializados ou serviços. O quadro 2 descreve a lista de processos presentes nesta categoria de processos.

Este processo pressupõe a existência de contratos de fornecimento, nos quais estão detalhados os requisitos que devem ser observados na realização do processo. Tais contratos orientam o agendamento e o gerenciamento das entregas individuais de componentes e produtos. Os requisitos para entrega, recebimento, verificação, transferência e autorização de pagamento também devem ser detalhados no plano de fornecimento.

Quadro 2 – Descrição dos processos SCOR para fornecimento na produção puxada.

$S_3$	Processos decompostos
$S_{3.1}$	Identificação de potenciais fornecedores que atendam às especificações de produto ( <i>Identify Sources of Supply</i> )
$S_{3.2}$	Seleção final de fornecedores e negociação para estabelecimento de um contrato ( <i>Select Final Supplier(s) and Negotiate</i> )
$S_{3.3}$	Agendamento e acompanhamento das entregas de produtos de maneira a atender ao contrato ( <i>Schedule Product Deliveries</i> )
$S_{3.4}$	Recebimento dos produtos contratados ( <i>Receive Product</i> )
$S_{3.5}$	Verificação se os produtos recebidos estão em conformidade com os requisitos previstos em contrato ( <i>Verify Product</i> )
$S_{3.6}$	Transferência dos produtos recebidos para local apropriado na cadeia de suprimentos ( <i>Transfer Product</i> )
$S_{3.7}$	Autorização de pagamento ao fornecedor pelos produtos e /ou serviços prestados ( <i>Authorize Supplier Payment</i> )

Fonte: SCC (2009).

### 2.3.2 Processos de fabricação na montagem puxada ( $M_2$ e $M_3$ )

No modelo SCOR, a fabricação para a produção puxada pode ser tanto voltada à produção de componentes ( $M_2$ ) quanto voltada à montagem de produtos destinados ao cliente final ( $M_3$ ). Como mostrado no quadro 3, as duas categorias são semelhantes, à exceção dos processos  $M_{3.1}$  e  $M_{3.4}$ , que não estão presentes na fabricação de componentes e são realizados apenas na montagem final dos produtos.

Os processos de fabricação de componentes resultam em planos de produção para os componentes necessários à produção de um produto. Neles são especificadas as quantidades a serem fornecidas de cada componente, gerando assim uma programação do que deve ser fabricado por cada fornecedor. A programação da produção deve observar o sequenciamento, a dependência dos recursos disponíveis e as características de *setup* e de operação de cada equipamento fabril. Em geral, as atividades de produção de componentes intermediários são coordenadas após o agendamento da produção dos produtos acabados.

Os processos de fabricação de produtos finais buscam a realização da produção de acordo com requisitos impostos pelos clientes. Em

geral, esses processos requerem que as instruções de trabalho possam ser definidas ou redefinidas e as rotas dos suprimentos para a fabricação possam ser criadas e alteradas em função da demanda.

Os processos de fabricação de produtos finais buscam, de acordo com requisitos impostos pelos clientes, a realização da produção. Em geral, esses processos requerem que o planejamento da produção possa ser definido e redefinido. Implicando assim nas rotas dos suprimentos para a fabricação, que também precisam ser criadas e alteradas de acordo com a demanda.

Quadro 3 – Definição dos processos SCOR para fabricação na produção puxada.

$M_2$	$M_3$	Processos decompostos
	$M_{3.1}$	Finalização requerida após o recebimento do pedido, mas antes de iniciar a montagem final ( <i>Finalize Production Engineering</i> )
$M_{2.1}$	$M_{3.2}$	Elaboração dos planos de produção ( <i>Schedule Production Activities</i> )
$M_{2.2}$	$M_{3.3}$	Seleção e movimentação física de materiais e componentes entregues para a produção ( <i>Issue Sourced / In-Process Product</i> )
	$M_{3.4}$	Produção e testes para garantir conformidade do que foi produzido aos requisitos contratados ( <i>Produce and Test</i> )
$M_{2.3}$	$M_{3.5}$	Criação de pacotes de itens fabricados para transporte ( <i>Package</i> )
$M_{2.4}$	$M_{3.6}$	Preparação dos pacotes para expedição ( <i>Stage Finished Product</i> )
$M_{2.5}$	$M_{3.7}$	Liberação para envio ( <i>Release Product to Deliver</i> )
$M_{2.6}$	$M_{3.8}$	Gerenciamento e coleta de resíduos decorrentes da produção e testes realizados ( <i>Waste Disposal</i> )

Fonte: SCC (2009).

### 2.3.3 Processos de entrega na montagem puxada ( $D_3$ )

Esta categoria envolve os processos para obter e alocar recursos e transportar os pedidos realizados pelos clientes. O atendimento do pedido pode ser realizado de forma parcial ou integral, transportando produtos e componentes para atender às solicitações dos clientes, que podem ser tanto de indústrias quanto de clientes finais. A categoria

de processos SCOR que especifica a entrega de produtos a clientes em um sistema de produção puxada é composta de quinze processos, como pode ser observado no quadro 4. Estes podem ainda ser classificados em cinco grupos de atividades, quais sejam: recebimento do pedido (de  $D_{3.1}$  até  $D_{3.3}$ ); programação das entregas (de  $D_{3.4}$  até  $D_{3.7}$ ); preparação para transporte (de  $D_{3.8}$  até  $D_{3.11}$ ); transporte dos produtos ( $D_{3.12}$ ); e entrega dos produtos (de  $D_{3.13}$  até  $D_{3.15}$ ).

Quadro 4 – Definição dos processos SCOR para entrega na produção puxada.

$D_3$	Processos decompostos
$D_{3.1}$	Recebimento e respostas de propostas para transportar ( <i>Obtain and Respond to RFP/RFQ</i> )
$D_{3.2}$	Negociação e elaboração de propostas ( <i>Negotiate and Receive Contract</i> )
$D_{3.3}$	Estabelecimento de contratos e realização da programação inicial ( <i>Enter Order, Commit Resources and Launch Program</i> )
$D_{3.4}$	Criação da programação de entregas ( <i>Schedule Installation</i> )
$D_{3.5}$	Consolidação de cargas e seleção de modos e veículos mais eficientes ( <i>Build Loads</i> )
$D_{3.6}$	Criação de rotas para cada carga criada (Route Shipments)
$D_{3.7}$	Seleção de transportadores com o menor custo para a realização da rota ( <i>Select Carriers and Rate Shipments</i> )
$D_{3.8}$	Recebimento de produtos e componentes ( <i>Receive Product from Source or Make</i> )
$D_{3.9}$	Coleta de produtos para entrega ( <i>Pick Product</i> )
$D_{3.10}$	Preparação de produtos para envio ( <i>Pack Product</i> )
$D_{3.11}$	Carregamento do veículo e preparação da documentação para transporte ( <i>Load Product and Generate Shipping Docs</i> )
$D_{3.12}$	Transporte de produtos ( <i>Ship Product</i> )
$D_{3.13}$	Recebimento da carga ( <i>Receive and Verify Product by Customer</i> )
$D_{3.14}$	Entrega de produto funcional no lugar especificado pelo cliente ( <i>Install Product</i> )
$D_{3.15}$	Emissão de fatura ( <i>Invoice</i> )

Fonte: SCC (2009).

## 2.4 OPERAÇÕES DINÂMICAS

Quebras de veículos, cancelamento ou solicitação de serviços, mudanças nas prioridades das tarefas, atrasos decorrentes de engarrafamentos em vias urbanas, são alguns incidentes que interferem nas atividades de transportes e que podem ser tratados nos modelos dinâmicos de roteirização. A roteirização dinâmica de veículos, ao contrário dos métodos estáticos, permite a consideração de incidentes após iniciadas as operações de transporte, comumente encontrados no cenário real de distribuição de produtos.

Incidentes podem ser classificados em três categorias segundo sua ocorrência no tempo: *i*) abruptos, que acontecem instantaneamente com impacto nas operações futuras; *ii*) incipientes, que possuem um padrão de comportamento anômalo que se acumula com o tempo e pode levar a problemas operacionais, principalmente no final de uma rota; e *iii*) intermitentes, que acontecem instantaneamente, mas que também deixam de ocorrer abruptamente (ISERMANN, 2005; NOVAES; BURIN; BEZ, 2012). O quadro 5 apresenta alguns exemplos de incidentes citados na literatura.

Neste sentido, uma das principais dificuldades inerentes aos modelos dinâmicos de roteirização está relacionada ao tempo de ajustes de rotas, uma vez que os algoritmos de roteirização que garantem solução ótima são de ordem combinatória. Tais algoritmos geralmente requerem elevado tempo de processamento, o que os torna incompatíveis com situações que exijam baixo tempo de resposta para lidar com incidentes. Para alcançar soluções em tempo computacional aceitável, diferentes heurísticas e meta-heurísticas têm sido propostas (ver seção 3.3). Apesar de, geralmente, obterem boas soluções, estas heurísticas não garantem a solução ótima dos problemas.

Em um contexto OEM, alguns estudos sugerem que um Prestador de Serviços Logísticos (PSL) seja responsável pelos deslocamentos realizados entre as indústrias em um contexto OEM (NOVAES et al., 2011). Para isto, a empresa montadora, responsável pelo planejamento, informa a programação de coletas que precisam ser realizadas nos seus fornecedores. Tendo isto em vista, o PSL pode criar rotas eficientes no início de suas operações, mas a existência de eventos não planejados durante as operações pode fazer com que o planejamento inicial torne-se ineficiente, ou mesmo impossível de ser realizado. A natureza distribuída dos transportes (tanto geográfica quanto organizacionalmente) torna ainda mais complexa a atividade de detectar, diagnosticar e corrigir falhas durante as operações dos veículos na realização dos roteiros.

Assim, é preciso que sejam desenvolvidas novas técnicas que auxiliem a operacionalização das coletas planejadas antecipadamente — sistemas multiagentes são capazes de lidar com essas questões operacionais.

Por outro lado, a empresa montadora deve se precaver de eventuais paradas na linha de produção por falta de matérias primas. Tais problemas podem ser tratados com técnicas de detecção de falha, como pode ser observado nos estudos de Rabelo, Camarinha-Matos e Afsarmanesh (1999), Shen, Wang e Hao (2006), Guo e Zhang (2009). Nestes casos, soluções alternativas devem ser propostas a fim de evitar que a linha de produção cesse.

Quadro 5 – Exemplos de incidentes citados pela literatura.

Tipo de falha	Exemplos de falha
Abruptos	Quebra de veículo (XIANG; CHU; CHEN, 2008) Chegada de novas requisições (PILLAC et al., 2013) A disponibilidade ou não de tripulação (PILLAC et al., 2013) Mudanças nas condições das vias (PILLAC et al., 2013) Mudança de prioridades das tarefas (SMITH et al., 2010)
Incipientes	Identificação de congestionamento (TANIGUCHI; SHIMAMOTO, 2004; NOVAES; BURIN; BEZ, 2012) Piora das condições de conservação dos produtos (NOVAES A. G. N. ; CARVALHO, 2013)
Intermitentes	Não foram identificados estudos em DVRP nesta categoria.

Fonte: Elaborado pelo autor.



### 3 ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Dentre as atividades logísticas, a atividade de transporte tem recebido grande importância, isto se dá pela customização cada vez maior dos produtos e pela realização de um maior número de entregas em lotes cada vez menores. De fato, o rumo tomado pela economia mundial tem estimulado o transporte de mercadorias; exemplos de políticas que favoreceram esse crescimento consistem na globalização e na liberação de mercados (GOEL, 2008). Outro aspecto marcante dos últimos anos vem sendo o crescimento acelerado de centros urbanos, fenômeno que tem feito surgir cidades com elevado índice demográfico. Isso associado a problemas estruturais frequentemente observados, ao mesmo tempo em que aumenta a demanda por transportes, dificulta a realização destas atividades. Uma consequência direta desse crescimento urbano é a observação recorrente de congestionamentos, o que prejudica a velocidade operacional dos veículos de transporte.

Uma forma de lidar com essa questão é buscar realizar rotas mais eficientes, que utilizem melhor a frota disponível, reduzindo o número de veículos necessários para a realização das tarefas e reduzindo o número de tarefas não realizadas ao final do roteiro. Para isso, métodos de roteirização devem ser empregados para satisfazer as diferentes restrições comumente observadas para a criação destes roteiros, tais como: existência de janelas de tempo, utilização de veículos com capacidade limitada, a liberação para que os veículos iniciem e terminem suas rotas em lugares diferentes, e a alocação de tripulação. Além disto, outras questões dinâmicas afetam o planejamento inicial das rotas, de modo que estas precisam ser revistas para lidar com novas informações percebidas apenas posteriormente ao início da programação.

Este capítulo traz uma visão geral dos VRP e de suas diferentes aplicações (Seção 3.1), apresentando diferentes métodos capazes de lidar com a complexidade combinatorial deste problema (Seção 3.3). Por fim, são destacadas potenciais utilizações destes em ambientes dinâmicos (Seção 3.2), assim como na resposta à detecção de congestionamentos.

#### 3.1 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O problema de roteirização de veículos (ou *Vehicle Routing Problem* — VRP) foi discutido inicialmente por Dantzig e Ramser (1959),

os autores estudaram o problema da construção de um roteiro ótimo para caminhões de entrega de gasolina. Na concepção inicial do problema, os veículos tinham limitação de capacidade e transportavam o combustível de um único terminal para múltiplos postos. O objetivo era reduzir a frota e a distância percorrida para atender a demanda de todos os postos.

Este pode ser definido por um caminho de um grafo não direcionado onde cada nó é visitado uma única vez. No caso de problemas onde o início e o fim do roteiro devam dar-se no mesmo nó, fala-se de ciclo hamiltoniano. Esses conceitos são importantes por representar formalmente uma notação para a construção de uma rota num grafo. A formalização pode ser realizada como se segue, onde, dada uma rede  $G = [N, A, C]$ , onde:  $N$  é o conjunto de nós,  $A$  é o conjunto de arcos e  $C$  é a matriz de custos (CHRISTOFIDES, 1975). Cada elemento  $c_{ij}$  da matriz de custos corresponde a algum tipo de impedância (tempo, custo, dificuldade, etc.) a ser vencida para o deslocamento no arco  $(a_{ij})$ , que vai do nó  $i$  para o nó  $j$ . De modo análogo, a matriz de solução  $X$  contém as variáveis de decisão do problema denotadas por  $x_{ij}$ .

O VRP é estudado por matemáticos desde 1930, e diferentes aplicações e adaptações já têm sido realizadas (BODIN et al., 1983; BERTSIMAS, 1988). Seu objetivo é encontrar o ciclo hamiltoniano que tenha o menor custo. Logo, para percorrer todos os vértices de um grafo  $G$ , sem repetir a visita de um vértice, é preciso definir a matriz de decisão  $X = (x_{ij})$  onde exatamente 1 (um) arco  $(i, j)$  emana de cada nó  $i$ ,  $a_i$ , e também exatamente 1 (um) arco incide em cada vértice  $j$ ,  $b_j$ . O TSP pode ser definido matematicamente da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j = 1 \quad \forall j \in N \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.3)$$

$$X = (x_{ij}) \in S \quad (3.4)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad \forall i, j \in N \quad (3.5)$$

onde o conjunto  $S$  é composto por restrições que impedem a

formação de subroteiros (BODIN et al., 1983).

A partir desta definição inicial — realizado por Dantzig e Ramser (1959) como uma generalização do TSP — o VRP pode ser definido como um problema de criação de rotas sobre o grafo  $G$  para  $m$  veículos idênticos, onde estes iniciam e terminam o roteiro em um depósito (comumente utiliza-se  $v_0$  como vértice inicial). Desta maneira, todos os  $n$  clientes têm de ser visitados exatamente uma única vez, enquanto que o custo global de atendimento destes clientes é reduzido (PILLAC et al., 2013). Algumas extensões deste modelo propuseram restrições adicionais a fim de analisar problemas mais concretos, como: capacidade limitada dos veículos, utilização de frota heterogênea, restrições temporais para a realização das visitas (podendo ser rígidas ou flexíveis), relações de precedência entre visitas, múltiplas viagens para cada veículo da frota, existência de múltiplos depósitos, demanda incerta, etc.

Acerca da limitação de capacidade dos veículos, em geral aplica-se para cargas pesadas (*e.g.* grãos, cerâmicas, etc.) ou volumosas (*e.g.* algodão, cigarros, canos, etc.), pode ser expressa pelo vetor  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_v\}$ . Em geral, dois tipos de restrições são frequentemente encontradas na literatura: de peso, associadas a produtos mais densos, como minérios, grãos, etc.; e, de volume, relacionada geralmente a produtos de baixa densidade, ou que tenham restrições específicas quanto ao transporte dentro do veículo, como algodão *in natura*, líquidos, materiais explosivos, produtos de alto valor agregado, cargas vivas, produtos refrigerados, etc. Ao restringir a quantidade de produtos transportados em cada veículo, um número maior de roteiros tende a ser gerado.

Em casos onde são utilizados veículos de diferentes capacidades, característicos de empresas PSL especializadas no transporte de cargas, a utilização de caminhões e carretas de diferentes tipos permitem uma melhor adequação da frota à demanda por serviços de transportes. Observando a compatibilidade entre cada um dos  $p$  tipos de produtos ( $P = \{p_1, p_2, \dots, p_p\}$ ) e cada veículo disponível ( $V$ ), pode-se criar uma matriz de compatibilidade  $CP$  (Equação 3.6), de modo que necessite-se conhecer a quantidade de um produto  $p_p$  que pode ser transportada por um veículo  $v_v$ .

$$CP = [cp_{pv}] \quad \forall p \in P \text{ e } \forall v \in V \quad (3.6)$$

No caso de transporte multimodal, onde se utilizam caminhões,

trens, navios, balsas, dutos, etc., o modelo deve ainda lidar com a compatibilidade dos modos com os tipos de carga. Cada modo possui características específicas de custos, envolvendo: transbordo, deslocamento da carga, flexibilidade do agendamento dos veículos, necessidade de terminais específicos, etc.

O problema de VRP clássico tem apenas um ponto de partida e de chegada na rede. Este é o local que representa os depósitos onde os veículos iniciam e finalizam suas operações. Para situações onde não exista a restrição de mesmo local para início e fim da rota, pode-se visualizar o problema com a existência de  $d$  locais de depósitos ( $D = \{d_1, d_2, \dots, d_d\}$ ). Assim, é necessário rever algumas restrições que verificam a contagem do número de arcos que chegam e que deixam os nós. Uma questão importante nesse tipo de problema é o fato de que os veículos que iniciam em um nó podem finalizar sua operação em outro nó. Isto pode acarretar, ao final do roteiro, em um excesso de veículos em alguns depósitos e na falta destes em outros.

Outra variação do VRP contempla a utilização de janelas de tempo para a realização das visitas, sendo conhecido como problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (ou *Vehicle Routing Problem with Time Windows* — VRPTW). Este problema é computacionalmente ainda mais complexo que o VRP, pois decorre do fato de que o veículo não pode realizar a visita a qualquer instante, mas sim a um nó  $i$  durante o intervalo de tempo  $[t_{0i}, t_{1i}]$ . Schönberger e Kopfer (2007) desenvolveram um sistema onde os problemas de janelas de tempo podem ser flexibilizados (denominado de *soft time windows*), através de uma penalização crescente para entregas que se distanciam da janela de tempo prevista.

Ao observar a natureza das tarefas realizadas, uma variedade de estudos abordam situações de coletas, entregas ou coletas e entregas. No problema de coletas, os veículos envolvidos na roteirização realizam a coleta de produtos em cada visita realizada. Assim, o veículo parte do depósito vazio e vai adquirindo carga no decorrer do roteiro. Em contrapartida, no problema de entrega o veículo parte do depósito cheio e vai distribuindo a carga no decorrer do percurso. Neste caso, a ordem de carregamento das cargas deve ser realizada de acordo com a sequência de visita do roteiro, reduzindo assim o tempo de serviço para descarga das cargas. Entregas não realizadas geram um impacto negativo, principalmente para as empresas que aguardam por essas mercadorias, pois não poderão contar com essas para suas operações. Por sua vez, no problema em que coletas e entregas são realizadas simultaneamente os veículos precisam montar seu roteiro de cargas e descargas com o

cuidado de garantir que a capacidade máxima de carga do veículo seja respeitada. Esta capacidade normalmente é representada por peso, volume, ou mesmo ambos. Vale ressaltar outra restrição de capacidade, que diz respeito ao valor da carga: por questões de segurança, muitas seguradoras impõe um valor máximo que pode ser transportado por cada tipo de veículo.

Para finalizar a discussão acerca dos principais tipos de problemas relacionados com a roteirização dinâmica de veículos, cita-se o problema de roteirização estocástica de veículos (*Stochastic Vehicle Routing Problem* — SVRP). Este reporta-se a uma adaptação do VRP onde variáveis estocásticas são levadas em consideração dentro do modelo. Exemplos de variáveis que podem ser deste tipo, são: demandas de clientes, quebras, velocidades esperadas, etc. O objetivo destes problemas é a minimização do valor “esperado” de alguma medida do roteiro, como: tempo, distância, custo, etc.

Neste trabalho, será realizada uma aplicação utilizando o problema de coleta. Neste caso, os veículos necessitam partir do depósito e retornar a este ao final da operação, formando assim um roteiro fechado. Para encontrar a rota de vários veículos, utilizou-se de uma técnica do tipo *cluster-first-route-second* (BODIN et al., 1983). Dessa maneira, primeiramente são criados distritos de atendimento (a técnica utilizada foi descrita na seção 5.3.5), e em seguida, é gerada a rota para o atendimento dos clientes em cada distrito.

### 3.2 ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS

O desenvolvimento tecnológico tem permitido que as empresas criem estratégias para lidar com os eventos dinâmicos cada vez mais presentes nas operações. Entretanto, é necessário fazer uso inteligente da informação em tempo real para apoiar a realização das rotas de maneira a melhorar o nível de serviço prestado aos clientes (LARSEN; MADSEN; SOLOMON, 2008). Os DVRP sugerem que as rotas possam ser atualizadas mesmo depois de seu início, mudando na medida em que novas informações são adicionadas ao modelo. Trabalhos, como os de Schönberger e Kopfer (2007) e Maciejewski e Nagel (2012) consideram a demanda incerta, de modo que algumas requisições são somente conhecidas após o início das operações. Desse modo, a autoridade planejadora deve decidir como lidar com as novas demandas, atualizando as rotas dos veículos já em operação.

Um aspecto crucial deste tipo de problema é a frequência e o

tempo disponível para reagir à uma nova informação percebida. Assim, quando uma nova informação é captada, pode-se verificar se há tempo disponível para uma determinada reação. Esta verificação da existência de tempo hábil para reagir às mudanças constatadas favorece a adoção de reações mais ou menos eficazes.

Por isso, mostra-se importante identificar o grau de dinamismo de determinados problemas, o que permite quantificar o impacto de requisições realizadas fora do período de planejamento. O grau de dinamismo pode auxiliar na avaliação dos custos decorrentes das tarefas adicionadas tardiamente ao roteiro, inclusive no que diz respeito ao dimensionamento da dificuldade em lidar com os eventos dinâmicos nos problemas de roteirização de veículos. Esse dinamismo varia de acordo com cada problema de roteirização, com as empresas envolvidas, com as pessoas que gerenciam os processos, com os veículos utilizados; em suma, para medir o dinamismo é necessário realizar simplificações e escolher indicadores mais adequados ao interesse de cada estudo.

Larsen, Madsen e Solomon (2002) propuseram uma maneira de medir o grau de dinamismo pelo tempo de reação disponível, através do uso de um indicador (*edod*) do grau efetivo de dinamismo (Equação 3.7). Esse indicador varia entre 0 (puramente estático) e 1 (puramente dinâmico). O autor ainda adaptou o índice para problemas com janelas de tempo, o indicador  $edod_{tw}$  é obtido pela equação 3.8.

$$edod = \frac{1}{n_{tot}} \sum_{i=1}^{n_{imm}} \left( \frac{t_i}{T} \right) \quad (3.7)$$

$$edod_{tw} = \frac{1}{n_{tot}} \sum_{i=1}^{n_{imm}} \left( 1 - \frac{r_i}{T} \right) \quad (3.8)$$

onde,

$t_i$  é o tempo da  $i$ -ésima tarefa, calculado desde o início do horizonte de tempo (0) até o fim do horizonte de tempo ( $T$ );

$n_{imm}$  é o número de requisições recebidas antes do planejamento da rota,  $n_{adv}$  é o número de requisições recebidas após o planejamento e o total de requisições  $n_{tot}$  é igual a  $n_{imm} + n_{adv}$ ;

$[e_i, l_i]$  é a janela de tempo para o serviço do cliente  $i$ ;

$r_i$  é o tempo de reação para a requisição  $t_i$ , que pode ser definido por  $l_i - t_i$ .

Durante a operação nos roteiros, os veículos podem fazer uso do grau de dinamismo para calcular suas propostas de modo mais justo (ver diferentes tipos de negociação na seção 4.2). Isto é, serviços solici-

tados mais cedo podem ser planejados mais adequadamente, custando menos para serem transportados — logo, permitindo que os preços praticados pelas transportadoras sejam menores.

### 3.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Diferentes variáveis estocásticas afetam diretamente a realização das rotas dos veículos. Assim, para serem capazes de reagir às mudanças adequadamente, métodos de otimização precisam ser desenvolvidos a fim de ajustar as rotas em tempo de operação. São discutidos métodos exatos na seção 3.3.1 e métodos heurísticos na seção 3.3.2 à 3.3.5.

#### 3.3.1 Métodos exatos

Existe uma variedade de métodos de otimização combinatorial para a resolução dos problemas de roteirização (BERTSIMAS, 1988; LAPORTE, 1992). Apesar de estes algoritmos serem capazes de obter a solução ótima, somente podem resolver problemas relativamente pequenos, devido ao elevado tempo computacional requerido. Para que uma solução seja considerada ótima, é necessário que seja provado por meios matemáticos que não é possível obter uma nova solução melhor que a anterior.

A primeira técnica identificada foi a de ramificar e limitar (ou *assignment lower bound and a related branch-and-bound algorithm*). Esta técnica utiliza uma relaxação do problema de VRP, o m-TSP (LAPORTE, 1992). O autor propôs uma abordagem para um problema de otimização com um único depósito e  $m$  veículos, de modo que devem ser selecionadas as  $m$  rotas de menor custo iniciando e terminando no depósito, onde cada vértice deve ser visitado uma única vez. Laporte (1992) identificou um limite superior para o problema, fazendo uma decomposição do problema m-TSP em 1-TSP. Numa outra aplicação desse método, Ralphs (2003) o utilizou para particionar um problema em subproblemas. Neste caso, frequentemente obtém-se soluções parciais para o problema que, se combinadas, não são viáveis para o problema inicial (RALPHS, 2003). Isto torna possível encontrar uma solução que pode delinear um limite mínimo para o problema. Outra técnica do tipo *branch-and-bound* é a de planos de corte, ou *cutting plane*. Esta sugere uma relaxação inicial das restrições e, após isso, a realização buscas de modo iterado por planos de corte que permitam a identificação

da solução ótima (FÜGENSCHUH; MARTIN, 2005).

Além destes, pode-se citar o método da relaxação lagrangeana, o qual também pode ser decomposto em subproblemas. Nesse método as restrições mais limitadoras são relaxadas através do uso de multiplicadores, conhecidos como multiplicadores de Lagrange (ARAUJO, 2010). Todavia, a principal dificuldade deste método está em identificar os multiplicadores ótimos. Kohl e Madsen (1997) realizam uma aplicação desse método ao problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, onde cada veículo foi tratado como um subproblema independente. No estudo dos autores, os multiplicadores de Lagrange representam o preço de serviço a um cliente. Pela relaxação realizada, pode-se chegar ao limite inferior para o problema (KOHL; MADSEN, 1997), isto é, pode-se identificar o número mínimo de veículos necessários para a sua solução ótima.

Os métodos supracitados auxiliam na identificação da solução ótima de diferentes problemas, estando disponíveis em diferentes sistemas comerciais de otimização, *e.g.* CPLEX, MINTO, SIP, LINGO, SYMPHONY, etc. (FÜGENSCHUH; MARTIN, 2005).

### 3.3.2 Métodos heurísticos de construção

Os métodos heurísticas de construção de roteiro têm como objetivo encontrar uma rota inicial para um determinado problema. Apesar desta não ser ótima, é produzida uma rota inicial razoável em um tempo computacional reduzido. Diferentes heurísticas podem servir à geração do roteiro inicial, quais sejam: inserção do mais próximo, inserção do mais distante, inserção arbitrária, ganhos de Clark e Wright, árvore mínima de busca, heurística de Christofides, inserção rápida pela envoltória convexa, pelo maior ângulo ou pela relação de diferença, etc. (BODIN et al., 1983; LAPORTE, 1992; BURIN, 2011).

Neste trabalho foi utilizada a heurística de inserção do mais distante, conforme descrito no algoritmo 1. Onde é informado para a heurística um vetor de vértices  $N$ , uma matriz de arestas  $A$  e uma matriz de custos associados a cada aresta  $C$ , o resultado desta heurística é uma rota inicial  $R$ .

---

**Algoritmo 1:** Heurística de inserção do mais distante.
 

---

```

Data: Grafo  $G = [N, A, C]$ 
Result: Roteiro inicial  $R$ 
 $R[node] \leftarrow null$  ;
 $origem \leftarrow NodeCandidateRandom(N)$  ;
 $R[1] \leftarrow origem$  ;
/* Inclusão do segundo nó do roteiro */
for  $a(i, j) \in A$  do
  |  $nextDistance \leftarrow 0$  ;
  |  $nextNode \leftarrow null$  ;
  | if  $i == origem$  and  $C(i, j) > nextDistance$  then
  | |  $nextDistance \leftarrow C[i, j]$  ;
  | |  $nextNode \leftarrow j$  ;
  | end
end
 $AddNodeAtRoute(nextNode, R)$  ;
 $RemoveNodeFromCandidates(nextNode, NC)$  ;
/* Inclusão do restante dos nós do roteiro */
while  $Length(R) < Length(N)$  do
  | for  $a(x, y) \in R$  do
  | | for  $z \notin R$  do
  | | |  $nextDistance \leftarrow 0$  ;
  | | |  $nextNode \leftarrow null$  ;
  | | |  $nextArcToBeUpdated \leftarrow null$  ;
  | | | if  $(C[x, z] + C[z, y] - C[x, y]) > nextDistance$ 
  | | | then
  | | | |  $nextDistance \leftarrow C[i, j]$  ;
  | | | |  $nextNode \leftarrow j$  ;
  | | | |  $nextArcToBeUpdated \leftarrow a(x, y)$  ;
  | | | end
  | | end
  | end
  |  $IncreaseRoute(R, nextNode, nextArcToBeUpdated)$  ;
end

```

---

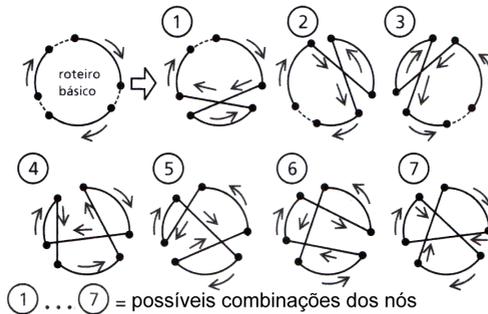
Fonte: Adaptado de Bodin et al. (1983).

### 3.3.3 Métodos heurísticos de melhoria

Os métodos heurísticos de melhoria de roteiros partem de um roteiro possível e, então, tentam melhorá-lo. Por serem heurísticos, tais métodos também não garantem a solução ótima. Dentre as diferentes heurísticas existentes para aperfeiçoar os roteiros, podem-se destacar os métodos: 2-opt, 3-opt e k-opt (LIN; KERNIGHAN, 1973; NOVAES, 2007). Tais métodos promovem melhorias em um dado roteiro ao testar trocas entre um número de  $k$  arcos.

O método 2-opt utiliza a estratégia de realizar permutas nos vértices a cada par de arcos. Essas permutas são realizadas de modo iterado até que nenhuma permuta viabilize um ganho na solução. De modo similar, o método 3-opt realiza  $2^3 - 1 = 7$  permutações a cada combinação de três arcos do roteiro (como pode ser visto na figura 6). Apesar de alcançar resultados mais precisos que os obtidos com o 2-opt, esse método é mais demorado computacionalmente. Por último, o k-opt (para  $k > 3$ ) é um procedimento que alcança resultados ainda melhores, mas o custo computacional cresce ainda mais rapidamente com o tamanho do problema. Se observado o seu custo computacional, em comparação com o 2-opt ou 3-opt, os ganhos obtidos nem sempre justificam a sua utilização. O algoritmo 2 descreve o funcionamento do 2-opt.

Figura 6 – Possíveis recombinações de nós no método 3-opt.



Fonte: Novaes (2007).

---

**Algoritmo 2:** Heurística de melhoria 2-opt.
 

---

```

Data: Grafo  $G = [N, A, C]$  e Roteiro inicial  $R$ 
Result: Roteiro melhorado  $R$ 
theBest  $\leftarrow$  false ;
repeat repetir até que nenhuma troca permita um melhor
resultado
  for  $a(i, j) \in R$  do
    for  $a(k, l) \in R$  do
      if  $a(i, j) \neq a(k, l)$  then
        distActual  $\leftarrow$   $c(i, j) + c(k, l)$  ;
        distNew  $\leftarrow$   $c(k, i) + c(l, j)$  ;
        if distNew  $<$  distActual then
          updateRoute( $R$ ) ;
          stopThisLoopAndBegin() ;
        end
      end
    end
  end
  theBest  $\leftarrow$  true
until not theBest;

```

---

Fonte: Adaptado de Lin e Kernighan (1973).

### 3.3.4 Métodos compostos

Os métodos compostos partem de um método para a construção de um roteiro inicial (Seção 3.3.2) e, com as rotas obtidas através desses métodos, utilizam imediatamente uma (ou várias) heurísticas de melhoria (Seção 3.3.3). Como os resultados compostos combinam heurísticas de maneira serial, o tempo computacional estimado é a soma do tempo das heurísticas. Entretanto, os resultados obtidos podem variar de acordo com as combinações utilizadas. Como exemplo, podem-se citar os resultados obtidos por Syslo, Deo e Kowalik (2006) onde, em uma distribuição randômica dos nós na rede, observou-se que a heurística composta pelos métodos de geração do roteiro pela inserção do mais distante e de melhoria 3-opt alcançou bons resultados. Esta constatação foi confirmada em outros estudos de roteirização de veículos (NOVAES et al., 2011).

### 3.3.5 Métodos meta-heurísticos

As meta-heurísticas são estratégias heurísticas de alto nível, que não atendem a um problema específico e podem ter diferentes aplicações (BLUM; ROLI, 2003). Dentre as principais meta-heurísticas observadas, pode-se destacar: *Scatter search*, Busca tabu, *Simulated Annealing*, Redes Neurais, *Guided Local Search*, *Greedy Randomized Adaptive e Search Procedure (GRASP)* (BLUM; ROLI, 2003; MES; HEIJDEN; HARTEN, 2007). Diferentes métodos meta-heurísticos têm sido propostos para resolver problemas de roteirização de veículos; nesses casos, os algoritmos genéticos de colônias de insetos têm sido recorrentemente utilizados e, por isso, serão abordados a seguir.

As meta-heurísticas genéticas baseiam-se na teoria de seleção natural de Charles Darwin (DARWIN; BEER, 1869), onde se propôs que uma seleção natural favorece o indivíduo mais adaptado ao meio. Esses algoritmos codificam soluções possíveis para o problema em estrutura de dados chamadas de cromossomos. A execução de um algoritmo genético inicia-se com a criação de uma população inicial (geração inicial). Os indivíduos iniciais são então recombinados por meio de reprodução e mutações e, através da avaliação e seleção dos melhores indivíduos, é estabelecida uma nova geração (seleção natural). Ou seja, depois de gerada uma população inicial, dois cromossomos dessa população podem ser combinados de diferentes formas a fim de alcançar melhores indivíduos. Pode-se ainda utilizar um operador de mutação, o qual pode evitar que a convergência aconteça prematuramente. Novas gerações precisam ser constituídas até que o nível de convergência esperado seja alcançado. Neste tipo de modelo, a “qualidade” de uma solução é definida de acordo com a população corrente existente.

Assim, os algoritmos genéticos podem ser estruturados em duas partes: a codificação do problema e a função de avaliação. Os cromossomos podem ser codificados de diferentes formas: binária, real, inteira ou literal, etc. Em termos de uma codificação binária, por exemplo, com 10 *bits* podem-se construir até 1024 indivíduos diferentes. Por sua vez, a função de avaliação deve ser rápida, visto que tanto os membros iniciais da população quanto os gerados a partir destes precisam ser avaliados. O número de avaliações necessita ser alto o suficiente para garantir a convergência da solução encontrada. O algoritmo 3 apresenta o funcionamento dessa meta-heurística e um exemplo de como essa combinação pode ser realizada é representada nas equações de 3.10 até 3.12 (JAIN; MARTIN, 1998).

---

**Algoritmo 3:** Meta-heurística de algoritmos genéticos.

---

```

P ← GenerateInitialPopulation() ;
Evaluate(P) ;
while while termination conditions not met do
    | P' ← Recombine(P) ;
    | P'' ← Mutate(P') ;
    | Evaluate(P'') ;
    | P ← Select(P'' ∪ P) ;
end

```

---

Fonte: Blum e Roli (2003).

$$PaiA = a_1a_2a_3a_4a_5a_6 \quad (3.9)$$

$$PaiB = b_1b_2b_3b_4b_5b_6 \quad (3.10)$$

$$FilhoC = a_1a_2a_3a_4|b_5b_6 \quad (3.11)$$

$$FilhoD = b_1b_2b_3b_4|a_5a_6 \quad (3.12)$$

Em geral, esses algoritmos são utilizados com a finalidade de otimização, já existindo modelos aplicados a diferentes domínios. Liang e Huang (2006) desenvolveram uma heurística baseada em algoritmo genético para buscar a redução global de uma cadeia de suprimentos através de previsão de demanda. Outra aplicação, implementada por Novaes et al. (2011), para atender a problemas observados durante a operação de um veículo de transporte de carga, utiliza um algoritmo genético para criar rotas auxiliares considerando o envio de um veículo auxiliar.

Por sua vez, as meta-heurísticas de colônias de insetos baseiam-se no funcionamento de organismos simples, que podem formar sistemas complexos capazes de realizar atividades altamente elaboradas pela interação dinâmica entre cada participante da colônia (TEODOROVIC, 2008), como é o caso das colônias de formigas e das colmeias de abelhas. Tais modelos conseguem moldar o comportamento social de insetos para resolver diferentes problemas, e a sua implementação em MAS tem se mostrado eficiente em diferentes aplicações. Teodorovic (2008), através de uma revisão da literatura, apresenta os princípios básicos desta tecnologia, indicando o potencial destas em aplicações nas diferentes áreas da engenharia de transportes, com especial atenção

àquelas voltadas ao controle de tráfego e transporte.

Algumas características similares entre as abordagens de colônias de insetos são: incompletude da informação, falta de controle global e presença de dados descentralizados (TEODOROVIC, 2008).

A otimização através do método de colônia de formigas utiliza um conceito de feromônio global para diminuir o tamanho das rotas. Esse é uma meta-heurística capaz de resolver problemas de otimização com complexidade combinatorial (TEODOROVIC, 2008). Doerner et al. (2004) desenvolveram um modelo de colônia de formigas de modo paralelo para problema de roteamento de veículos (VRP).

Já o modelo de colmeia de abelhas tem seu funcionamento baseado num pequeno conjunto de regras, apresentadas no algoritmo 4. Apesar de existir um grande número de espécies de insetos, e de variações nos seus padrões comportamentais, é possível descrever o comportamento das abelhas da seguinte forma (CAMAZINE; SNEYD, 1991): cada abelha decide alcançar a fonte de néctar seguindo outra abelha da colmeia que já descobriu um caminho para as flores. Além disso, cada colmeia tem uma área chamada de pista de dança, onde as abelhas que descobriram flores dançam para convencer outras abelhas da colmeia a segui-las.

Tais modelos conseguem moldar o comportamento social de insetos para resolver diferentes problemas. A implementação destes comportamentos em MAS tem se mostrado eficiente em diferentes aplicações.

---

**Algoritmo 4:** Meta-heurística de colônia de formigas.

---

```

InitializePheromoneValues( $\tau$ ) ;
while while termination conditions not met do
    for all  $a \in A$  do
        |  $s_a \leftarrow \text{ConstructSolution}(\tau, H)$  ;
    end
    ApplyOnlineDelayedPheromoneUpdate( $\tau, \{s_a | a \in A\}$ ) ;
end

```

---

Fonte: Blum e Roli (2003).

### 3.4 DETECÇÃO DE CONGESTIONAMENTOS

De acordo com Pillac et al. (2013), áreas urbanas são frequentemente caracterizadas por alta variabilidade nos tempos de viagem. Logo, métodos de roteirização que desejem resultados mais confiáveis devem lidar com este problema. Conforme a classificação de Isermann e Balle (1997), falhas nas operações podem ser classificadas como: abruptas, incipientes e intermitentes. Para realizar a detecção (ou identificação) de uma situação de congestionamento, podem-se utilizar diferentes técnicas. Essas técnicas são realizadas em duas etapas, primeiramente coletam as informações acerca da utilização das vias pelos veículos, após isto, analisam se estas informações coletadas caracterizam, ou não, situações de congestionamentos. Dentre as técnicas de coleta de informações, podem ser citadas: laços detectores magnéticos, laços detectores indutivos, feixes de *laser*, sensores infravermelho, processamento de imagens, sensores GPS embarcados em veículos, etc. Por sua vez, diferentes técnicas podem ser utilizadas para a análise das informações, em geral, tais técnicas fazem uso de ferramentas estatísticas a fim de identificar situações de congestionamento.

Neste trabalho, utilizou-se o modelo de detecção de congestionamentos proposto por (NOVAES; BURIN; BEZ, 2012), onde essas ocorrências são realizadas de modo incipiente, com base nas observações de velocidade obtidas pelo modelo. Esse método permitiu que fossem analisadas as velocidades simuladas de cada veículo durante a operação. Assim, a cada nova observação (amostra de velocidade) é realizado um teste de análise sequencial (WALD, 1945; LAI, 2001) — conhecida como *Sequential Probability Ratio Test* (SPRT). Segundo (WALD, 1945), com

a utilização de análise sequencial, dada uma determinada probabilidade de erro, busca-se reduzir o número de amostras necessárias para se identificar o erro. Contrariamente a abordagem com tamanho de amostra fixa, um terceiro resultado pode ser obtido, quando a evidência não é suficiente para aceitar  $H_0$  ou  $H_1$ , nesse caso, mais amostras são requeridas a fim de evidenciar uma das duas hipóteses. Assim, a análise sequencial acompanha uma sequência dinâmica de observações, de modo que a decisão de parar ou não o experimento depende das informações anteriores à cada observação.

As técnicas clássicas de inferência estatística e teste de hipóteses adotam um tamanho fixo de amostra. Com essas abordagens busca-se minimizar a probabilidades de erro de um determinado tamanho de amostra. O tamanho da amostra é definido de antemão e, seguindo sua análise estatística, dois resultados são possíveis: aceita-se a hipótese nula  $H_0$ , ou aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$ . Nesta análise, a hipótese nula representa a situação padrão, enquanto que a hipótese alternativa indica a ocorrência de uma condição anormal de tráfego. Outra forma de realizar o teste de hipótese é pela utilização análise sequencial, esta aplica-se a situações em que o tamanho da amostra não é fixo, mas depende das observações que já foram realizadas.

Um caso típico de estimação sequencial pode ser observado com poucos parâmetros, por exemplo, o valor esperado  $\mu$  e o desvio padrão  $\sigma$  são requeridos para definir a distribuição de probabilidade de uma variável randômica  $x$  objeto desta análise. Se  $f(x, \mu, \sigma)$  denota a função de densidade de probabilidade de  $x$ , onde  $x$  é uma variável contínua. Entretanto, se  $x$  é discreta,  $f(x, \mu, \sigma)$  representa sua probabilidade. Seja  $\{x_1, x_2, \dots, x_l\}$  um conjunto de  $l$  observações independentes e sequenciais de  $x$ . Graças à independência das observações, a função de densidade probabilidade de probabilidade pode ser definida como na equação 3.13.

$$f(x_1, \mu, \sigma)f(x_2, \mu, \sigma) \dots f(x_l, \mu, \sigma) \quad (3.13)$$

Suponha que a distribuição da variável randômica  $x$  em consideração possui parâmetros desconhecidos. Uma indicação sobre os valores dos  $q$  parâmetros é chamado de uma hipótese simples, se esta determina unicamente os valores de todos os parâmetros de  $q$ . Todavia, chama-se de hipótese composta se existem mais de um valor para cada parâmetro (WALD, 1945). Ao analisar o teste de hipóteses simples  $\mu = \mu_0$  e  $\sigma = \sigma_0$ , onde  $\mu$  e  $\sigma$  designam, respectivamente, o valor

esperado e o desvio padrão da distribuição de probabilidade. Sendo essa hipótese denotada por  $H_0$ . Por sua vez, a hipótese alternativa de  $\mu = \mu_1$  e  $\sigma = \sigma_1$  é denotada por  $H_1$ . Assim, é possível testar os testes de hipóteses em um conjunto de observações sequenciais e independentes  $\{x_1, x_2, \dots, x_l\}$ . De acordo com os desenvolvimentos de Neyman and Pearson (LAI, 2001), erros podem ser de dois tipos, relacionados à aceitação ou rejeição da hipótese  $H_0$ . Um erro do primeiro tipo é cometido quando rejeita-se  $H_0$  sendo este verdadeiro, já o erro do segundo tipo é observado ao aceita-se  $H_0$  sendo este falso. O erro do primeiro tipo é denotado por  $\alpha$  e o do segundo tipo por  $\beta$ .

Para aplicar o SPRT proposto por Wald (1945), duas constantes positivas, A (Equação 3.14) e B (Equação 3.15), precisam ser calculadas.

$$A = \frac{(1 - \beta)}{\alpha} \quad (3.14)$$

$$B = \frac{\beta}{(1 - \alpha)} \quad (3.15)$$

Suponha-se que tenham sido realizados  $l$  eventos sucessivos, levando ao conjunto de observações  $\{x_1, x_2, \dots, x_l\}$ , neste evento o método SPRT é computado conforme equação 3.16.

$$\pi_l = \frac{f(x_1, \mu_1, \sigma_1)f(x_2, \mu_1, \sigma_1) \dots f(x_l, \mu_1, \sigma_1)}{f(x_1, \mu_0, \sigma_0)f(x_2, \mu_0, \sigma_0) \dots f(x_l, \mu_0, \sigma_0)} \quad (3.16)$$

Calculado o valor de  $\pi_l$ , três situações podem ocorrer:

- a) Se  $B < \pi_l < A$ , o experimento continua com a adição de uma nova observação;
- b) Se  $\pi_l \geq A$ , o experimento termina com a rejeição de  $H_0$ ;
- c) Se  $\pi_l \leq B$ , o experimento termina com a aceitação de  $H_0$ ;

Para fins de simplificação matemática, é conveniente calcular o logaritmo de  $\pi_l$ , ver equações 3.17 e 3.18.

$$z_i = \ln \frac{f(x_i, \mu_1, \sigma_1)}{f(x_i, \mu_0, \sigma_0)} \quad (3.17)$$

$$\pi_l^* = \ln(\pi_l) = z_1 + z_2 + \dots + z_l \quad (3.18)$$

Assim, o experimento continua se  $\ln(B) < \pi_l^* < \ln(A)$ , continuando com a obtenção de informação adicional; o processo termina com a rejeição de  $H_0$  se  $\pi_l^* \geq \ln(A)$ ; e termina com a aceitação de  $H_0$  se  $\pi_l^* \leq \ln(B)$ .

Em casos reais, hipóteses compostas podem ocorrer. Uma forma de lidar com problemas de análise sequencial com hipóteses compostas é a utilização de uma função ponderada associada com um algoritmo do tipo *generalized likelihood ratio* (BASSEVILLE; NIKIFOROV et al., 1993). Para fazer isto, duas funções de distribuição de probabilidade, com funções de densidade  $g(H_0)$  e  $g(H_1)$ , são introduzidas ao modelo. O SPRT é assim transformado em um *weighted likelihood ratio test* (BASSEVILLE; NIKIFOROV et al., 1993). Entretanto, para isso, é necessário encontrar as distribuições  $g(H_0)$  e  $g(H_1)$ , mas isto depende de informação detalhada normalmente não disponível em situações práticas. Neste trabalho, uma hipótese de teste composta é utilizada, a hipótese de teste composta pode ser representada por:  $H'_0 : \mu \geq \mu_0; \sigma = \sigma_0$  enquanto que,  $H'_1 : \mu \leq \mu_1; \sigma = \sigma_1$ , de tal modo que  $\mu_1 < \mu_0$ . Assumindo que as probabilidades dos erros de primeiro e de segundo tipo não devem exceder  $\alpha$  e  $\beta$ , pode-se utilizar o SPRT considerando a existência de hipóteses simples, assim,  $H'_0 : \mu = \mu_0; \sigma = \sigma_0$  enquanto que,  $H'_1 : \mu = \mu_1; \sigma = \sigma_1$ . Este modelo é usualmente suficiente numa invariância de escala, onde  $\sigma_1/\mu_1 = \sigma_0/\mu_0$  (LAI, 2001). Entretanto, enquanto o SPRT tem tamanho da amostra mínimo em  $\mu = \mu_0$  e  $\sigma = \sigma_0$  e em  $\mu = \mu_1$  e  $\sigma = \sigma_1$ , o tamanho máximo da amostra esperada pode ter um valor maior que o tamanho fixado para a amostra. Isso implica que, algumas vezes, o teste não será suficiente para detectar a hipótese  $H_1$  durante o roteiro analisado, gerando tarefas de coletas não realizadas ao final de um dia de trabalho. Porém, este número de tarefas não realizadas deverá ser drasticamente reduzido em experimentos dinâmicos quando comparados a experimentos estáticos (ver definição dos experimentos na seção 5.5).

No modelo, as condições de tráfego são avaliadas em termos de condições normais ou anormais, e, conseqüentemente, indicando o comportamento esperado para a velocidade do veículo local de  $s$ . De fato, desde que as distâncias variam ao longo do percurso e, conseqüentemente, os tempos de deslocamento resultantes também devem variar, a velocidade é uma variável mais apropriada para medir variações de tráfego. O ponto de decisão sequencial é definido como o instante em que a tripulação do veículo termina o atendimento à um cliente e está pronto para a próxima visita. Em tal momento, um sistema a bordo do veículo avalia o tempo de deslocamento  $t_{j-1,j}$  da visita  $j - 1$  para a visita  $j$ . A

velocidade média correspondente  $s$  é obtida simplesmente dividindo-se a extensão do segmento percorrido pelo seu respectivo tempo de deslocamento, ambos os elementos disponíveis no computador de bordo. Para os distritos sob análise, assume-se que não existem dados históricos suficientes sobre os valores de velocidade que cobrem as condições de tráfego padrão e congestionado. Em particular, a velocidade média  $s \geq s_0$  está relacionada com as condições de tráfego padrão e  $s \leq s_1$  representa o cenário de congestionamento. Esta informação, juntamente com a série de dados coletados até aquele momento, servirá como base para inferir se o tráfego é padrão ou congestionado, levando assim à decisão operacional apropriada.

Como mencionado, é necessário definir uma função distribuição de probabilidade  $f(s, \mu, \sigma)$  para representar a variável randômica  $s$  que dirigirá o processo de detecção de falha. Para selecionar esta função em ambientes reais de operação, uma análise empírica deve ser realizada. Nesta aplicação (de natureza metodológica) foram adotadas distribuições do tipo log-normal para representar a velocidade dos veículos no cenários  $H_0$  e  $H_1$  (LARSEN; MADSEN; SOLOMON, 2002). Para a distribuição log-normal, a função densidade de probabilidade é

$$f(s) = \frac{1}{sb\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln(s) - a)^2}{2b^2} \right], s > 0 \quad (3.19)$$

$$a = \ln(E[s]) - (1/2)b^2 \quad (3.20)$$

$$b^2 = \ln \left( 1 + \frac{\text{var}(s)}{E[s]^2} \right) \quad (3.21)$$

onde  $s$  é a velocidade local em km/h;  $E[s]$  e  $\text{var}[s]$  são, respectivamente, média e variância de  $s$ ;  $a$  e  $b$  são parâmetros da função lognormal, respectivamente, *location* e *scale*. Os parâmetros da curva lognormal de velocidade para trânsito normal ( $a_0$  e  $b_0$ ) e trânsito congestionado ( $a_1$  e  $b_1$ ) foram obtidos a partir do trabalho de Larsen, Madsen e Solomon (2002).

Fazendo as substituições de 3.19, 3.20 e 3.21, em 3.17 e 3.18; e fazendo as simplificações necessárias, têm-se que:

$$\pi_l^* = l \ln \left( \frac{b_0}{b_1} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \left[ \frac{\ln(s_i - a_0)^2}{b_0^2} \right] - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \left[ \frac{\ln(s_i - a_1)^2}{b_1^2} \right] \quad (3.22)$$

onde  $l$  é o número de ordem do teste,  $s_i$  é a velocidade medida

pelo veículo após a realização da tarefa  $i$ . Logo após a realização de cada visita o valor de  $\pi_i^*$  é calculado. Dependendo do valor obtido de  $\pi_i^*$ , três cenários são definidos: *i*) cenário  $h = 0$ , quando  $\pi_i^* \leq \ln(B)$ , com aceitação da hipótese  $H_0$ ; *ii*) cenário  $h = 1$ , quando  $\pi_i^* \geq \ln(A)$ , com aceitação da hipótese  $H_1$ ; *iii*) cenário  $h = 2$ , quando  $\ln(B) < \pi_i^* < \ln(A)$ , onde nenhuma decisão ainda pode ser realizada;

A ocorrência do cenário  $h = 1$  indica que um congestionamento foi detectado, i.e. o veículo pode não possuir mais tempo suficiente para a realização do roteiro previamente definido. Nestes casos, estratégias de colaboração precisam ser utilizadas a fim de garantir um nível de serviço satisfatório.

## 4 SISTEMAS MULTIAGENTES

O uso de agentes torna possível a modelagem dinâmica dos comportamentos existentes nas cadeias de suprimentos, dentre os primeiros modelos aplicados à área de produção e transportes, destacam-se os de Jennings (1995) e de Swaminathan, Smith e Sadeh (1998). Para Fox, Barbuceanu e Teigen (2000), um agente pode ser visto como um sistema autônomo com um objetivo determinado e que opera assincronamente, atuando de modo coordenado com outros agentes quando necessário. Por sua vez, Wooldridge (2002) define agentes como sistemas capazes de ter ações independentes de acordo com seu interesse. Há ainda outra definição, de Henoach e Ulrich (2009), que descrevem os agentes como entidades de *software* que são dedicadas a um propósito específico e que executam um conjunto de operações com a finalidade de realizar tarefas.

Neste trabalho, um agente é entendido como um sistema computacional dotado de algum nível de inteligência e capaz de realizar tarefas autonomamente, *i.e.* sem a dependência de seres humanos (LIANG; HUANG, 2006; GUO; ZHANG, 2009). Considerados apropriados para a solução de problemas distribuídos (WANG et al., 2008), possuem quatro características básicas conforme Wooldridge e Jennings (1995):

- Autonomia: controle da execução de suas tarefas, não precisando de humanos para realizá-las;
- Habilidade social: interação com outros agentes, ou mesmo com seres humanos;
- Reatividade: reação a mudanças do ambiente em que se encontram;
- Proatividade: mais que apenas responder a estímulos do ambiente, tem iniciativa e podem agir em função dos alvos para os quais foram criados.

De acordo com Dai e Chen (2011), quando múltiplos agentes interagem autonomamente uns com os outros, pode-se entender a existência de um sistema multiagentes (MAS). Esses podem realizar tarefas complexas através de coordenação, cooperação e negociação (WOOLDRIDGE, 2002). Um MAS pode ainda ser definido como uma rede fracamente acoplada <sup>1</sup> de agentes de *software* que interagem para re-

---

<sup>1</sup>O acoplamento descreve o grau em que os agentes dependem diretamente de

resolver problemas que estão além de suas capacidades individuais (JIAO; YOU; KUMAR, 2006).

Provenientes do campo de estudo da inteligência artificial distribuída, os MAS têm sido amplamente estudados na literatura (SHEN; WANG; HAO, 2006; LEITAO, 2009). Diferentes abordagens têm feito uso destes sistemas para o gerenciamento da cadeia de suprimentos, sugerindo modelos fechados, onde empresas não são capazes de surgir ou sair do sistema no meio das operações. Nesses modelos, as entidades compartilham um mesmo objetivo (SADEH et al., 2001).

As tecnologias baseadas em agentes proporcionam um meio interessante de integração e coordenação das atividades produtivas e de serviços. Elas tornam possível a modelagem dinâmica dos comportamentos existentes nas cadeias de suprimentos, tanto no que tange aos seus diferentes graus de restrições e políticas, quanto às contingências causadas pelas incertezas presentes na oferta e na demanda (KWON; IM; LEE, 2008). De acordo com Jiao, You e Kumar (2006), através de MAS, podem ser feitas a configuração, coordenação, negociação e controle de cadeias de suprimentos. Para isso, podem-se decompor os agentes em duas classes de entidades: estrutural e de controle (SHEN; WANG; HAO, 2006). Os agentes do tipo estrutural são aqueles que possuem diferentes papéis relacionados com a produção e distribuição de produtos, tais como: varejista, centro de distribuição, indústria, fornecedor, transportador, etc. Já os de controle estão relacionados aos processos de gestão do fluxo de produtos dentro da cadeia, quais sejam: informação, demanda, fornecimento, fluxo de materiais, etc.

Em sua revisão bibliográfica sobre agentes utilizados na logística, Lang et al. (2008), concluem que:

... problemas de planejamento de transportes têm características que correspondem a competências específicas de sistemas baseados em agentes. Em particular esses sistemas são capazes de lidar com planejamento interorganizacional e orientado a eventos, assim atendendo aos requisitos atuais no planejamento e execução de cadeias de suprimento. (LANG et al., 2008)

De acordo, Adler e Blue (2002) concluíram que os MAS servem como uma extensão natural aos ITS, especialmente devido à capacidade

---

outros agentes. O desenvolvimento de código com fraco acoplamento é um requisito para a autonomia dos agentes. O fraco acoplamento também é uma característica importante no desenvolvimento de *softwares*, uma vez que facilita a compreensão dos sistemas e realização de manutenções futuras.

de representar a colaboração entre os atores envolvidos na realização de serviços.

Diferentes vantagens foram observadas na literatura acerca do uso de MAS, quais sejam:

- **Autonomia:** devem ser capazes de tomar decisões a fim de alcançar seus objetivos (KRAUS; WILKENFELD; ZLOTKIN, 1995; KARAGEORGOS et al., 2003; GUO; ZHANG, 2009; FORGET; D'AMOURS; FRAYRET, 2008; ANOSIKE; ZHANG, 2009; LONG; LIN; SUN, 2011);
- **Complexidade:** diferentes tipos de comportamentos podem ser implementados através dos agentes (DAVIDSSON et al., 2005);
- **Descentralização, distribuição, ou localização distribuída:** podem ser executados em diferentes locais, ou equipamentos (KRAUS; WILKENFELD; ZLOTKIN, 1995; JULKA; SRINIVASAN; KARIMI, 2002; KARAGEORGOS et al., 2003; DAVIDSSON et al., 2005; LIANG; HUANG, 2006; FORGET; D'AMOURS; FRAYRET, 2008; ANOSIKE; ZHANG, 2009; GUO; ZHANG, 2009; ROBU et al., 2011; LONG; LIN; SUN, 2011);
- **Dinamicidade ou mutável:** é capaz de lidar com os eventos dinâmicos presentes no ambiente corporativo (DAVIDSSON et al., 2005; FRAMLING et al., 2006; ROBU et al., 2011);
- **Escalabilidade:** os problemas podem crescer ou reduzir de complexidade, mas podem ser resolvidos por um mesmo modelo (HOS-SACK et al., 2003; DAVIDSSON et al., 2005);
- **Flexibilidade:** adequa-se prontamente a alterações no ambiente, podendo ser executado em diferentes plataformas e utilizar diferentes linguagens de programação (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995; HOSSACK et al., 2003; KARAGEORGOS et al., 2003);
- **Integração com sistemas legados (ou abertura):** o MAS interage com sistemas especialistas das empresas a fim de participar das operações, do gerenciamento ou mesmo do planejamento (HOS-SACK et al., 2003; SHEN et al., 2006; GUO; ZHANG, 2009; SOROOR; TAROKH; SHEMSHADI, 2009; LONG; LIN; SUN, 2011);
- **Inteligência, colaboração ou coordenação:** agentes podem ter diferentes objetivos e estratégias implementadas internamente (KRAUS; WILKENFELD; ZLOTKIN, 1995; WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995; JULKA; SRINIVASAN; KARIMI, 2002; SHEN et al., 2006; JIAO;

YOU; KUMAR, 2006; FORGET; D'AMOURS; FRAYRET, 2008; ANOSIKE; ZHANG, 2009);

- Mobilidade: capacidade de deslocar-se entre diferentes unidades de processamento (JULKA; SRINIVASAN; KARIMI, 2002);
- Processamento paralelo: permite que problemas complexos sejam resolvidos através da composição de vários processamentos realizados em *hosts* diferentes (HOSSACK et al., 2003).

Neste capítulo são inicialmente apresentadas diferentes estruturas de controle para MAS (Seção 4.1), as quais se reportam às diferentes relações de subordinação que podem ser estabelecidas entre os agentes. Em seguida, são descritos diferentes mecanismos de negociação para a realização de acordos entre os agentes (Seção 4.2). Após, são discutidas as principais características de MAS, justificando-se a utilização da plataforma Jade neste trabalho (ver seção 4.3). Por fim, são estabelecidos os conceitos de simulação baseada em agentes e dos principais desafios associados a este tipo de ferramenta (Seção 4.4).

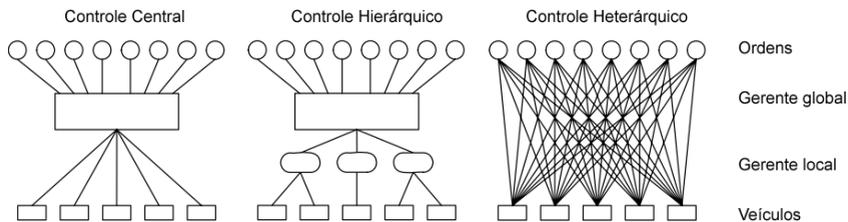
#### 4.1 ESTRUTURAS DE CONTROLE

Ao observar como os agentes interagem no MAS, podem ser identificadas três categorias de estruturas de controle: centralizado, hierárquico, heterárquico e híbrido (MES; HEIJDEN; HARTEN, 2007; ANOSIKE; ZHANG, 2009). A figura 7 ilustra diferentes estruturas de controle entre agentes numa aplicação de transportes, utilizando para isto agentes para representar: pedidos, coordenadores globais, coordenadores locais e veículos. Essas diferentes formas de controlar os agentes têm vantagens e desvantagens, de modo que cada problema, ou aplicação específica, pode ser mais adequado a uma ou outra estrutura de controle.

Na organização centralizada, os diferentes agentes envolvidos no MAS são subordinados ao comando de um agente centralizador. Esse agente central tem o conhecimento global sobre a realização das operações, de maneira que métodos de otimização global podem ser implementados. Uma vez que todos os agentes são subordinados a um único controlador, esta organização centralizadora pode levar a situações onde todo o sistema fracasse por uma falha em um determinado ponto do MAS (LEITAO, 2009).

Em um MAS hierárquico, há uma relação de subordinação entre os agentes, podendo existir vários níveis hierárquicos. Para realizar qualquer tipo de planejamento, programação ou melhoria, é preciso que

Figura 7 – Estruturas de controle.



Fonte: Mes, Heijden e Harten (2007).

a informação seja enviada dos agentes subordinados aos seus superiores imediatos. Nas organizações hierárquicas, por possuírem um viés centralizador, o fluxo de comunicações na rede tende a ser reduzido, podendo levar a situações onde parte do sistema pode ter problemas por falha de agentes supervisores.

Por outro lado, a estrutura heterárquica é mais adequada para aplicações robustas, *i.e.* são menos sensíveis a falhas e têm maior flexibilidade. Aplicações heterárquicas ainda são mais coerentes com a autonomia local e tomada de decisão cooperativa, uma vez que mantém em cada agente a responsabilidade local para atingir seus próprios objetivos. Nessas estruturas, espera-se que, através de bons resultados locais, um bom resultado global possa ser alcançado (MONOSTORI; VÁNCZA; KUMARA, 2006). Entretanto, nesses casos não existe conhecimento do problema global, o que resulta em um elevado fluxo de mensagens na rede.

Hossack et al. (2003) propuseram um MAS heterárquico para fornecer uma alternativa de integração flexível e escalável aos sistemas voltados à detecção de falha. O autor ressalta ainda como os sistemas integrados podem contribuir para a detecção de incidentes.

Neste trabalho, conforme será discutido na seção 5.4.1, será utilizada uma estrutura de controle hierárquica, onde cada agente transportador gerencia as operações de seus agentes veículos.

## 4.2 MECANISMOS DE NEGOCIAÇÃO

Para que agentes possam resolver conflitos, eles precisam colaborar durante as operações, sem deixar de lado seus interesses particulares

(WOOLDRIDGE, 2002). Dentre os diferentes tipos de acordos que podem ser realizados, desta-se a negociação, esta é um meio eficiente para que empresas possam interagir para a realização de algumas atividades (DAVIS; SMITH, 1983; LOPES; WOOLDRIDGE; NOVAIS, 2008). Em geral, o processo de negociação em MAS pode ser compreendido em três fases: *i*) convite, onde é iniciada a negociação; *ii*) envio de propostas, fase na qual os interessados em participar da negociação declaram essa vontade através de uma proposta; e *iii*) escolha, fase em que a melhor proposta é selecionada (JIAO; YOU; KUMAR, 2006; SHEN; WANG; HAO, 2006).

Um protocolo de negociação pode ser organizado em uma sequência de mensagens de acordo com certa lógica (JIAO; YOU; KUMAR, 2006). A especificação *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA) (FIPA, 2002) define estas mensagens de comunicação, que dependem dos mecanismos de negociação implementados (alguns desses mecanismos serão apresentados ainda nesta seção). As mensagens básicas de comunicação presentes na especificação proposta pela FIPA são as seguintes:

- *Accept Proposal*: ação de aceite de uma proposta previamente submetida para realizar uma tarefa;
- *Agree*: ação de concordância em realizar uma tarefa;
- *Cancel*: ação de um agente informar outro de que não mais tem intenção de que este realize a tarefa;
- *Call for Proposal*: ação de solicitação de propostas para realizar uma tarefa;
- *Confirm*: ação de confirmação de que uma proposição é verdade, onde sabe-se previamente que o destinatário tem esta dúvida;
- *Disconfirm*: ação de alerta de que uma determinada proposição é falsa, onde se sabe previamente que o destinatário tem esta dúvida;
- *Failure*: ação de informação de que uma ação foi tentada, mas a tentativa falhou;
- *Inform*: ação de informação de que uma dada proposição é verdade;
- *Inform If*: macro ação para informar ao destinatário se uma proposição é verdadeira ou não;

- *Inform Ref*: macro ação para o remetente informar ao destinatário o descritor correspondente de determinado objeto, por exemplo, um nome;
- *Not Understood*: ação de informação ao destinatário de que uma mensagem anteriormente enviada a ele não foi compreendida;
- *Propagate*: ação de solicitação ao destinatário para que trate a mensagem enviada como se enviada diretamente a ele, para que identifique os agentes informados no descritor e envie a mensagem propagada a estes;
- *Propose*: ação de submissão de uma proposta para realizar certa tarefa, dadas certas precondições;
- *Proxy*: ação de solicitação ao destinatário para seleção de agentes alvos que estejam descritos na mensagem, enviando a eles uma mensagem anexa à mensagem original;
- *Query If*: ação de questionamento a outro agente se dada proposição é verdadeira;
- *Query Ref*: ação de questionamento a outro agente sobre um objeto referenciado por uma expressão;
- *Refuse*: ação de recusa a realizar dada ação, explicando a razão para isto;
- *Reject Proposal*: ação de rejeição de uma proposta para realizar alguma ação durante a negociação;
- *Request*: ação de requerimento que o destinatário realize alguma ação;
- *Request When*: ação de requerimento que o destinatário realize alguma ação quando alguma proposição tornar-se verdadeira;
- *Request Whenever*: ação de solicitação de que o destinatário realize uma ação tão breve quanto o possível a partir do momento que uma proposição torne-se verdadeira e, a cada vez que ela torne-se verdadeira novamente;
- *Subscribe*: ação de solicitação do registro de algo, notificando o remetente toda vez que haja uma alteração.

Por fazerem parte de um conjunto de especificações da FIPA, o uso destas mensagens torna possível a implementação de mecanismos de negociação integráveis com diferentes aplicações. Estes mecanismos podem ser mais adequados para lidar com problemas de grande complexidade, como os de transporte, para os quais não existem soluções ótimas em tempo computacional satisfatório (MES; HEIJDEN; HARTEN, 2007).

Na aplicação realizada por Maciejewski e Nagel (2012), os autores propuseram um sistema de otimização baseado em agentes para a alocação de tarefas conhecidas inicialmente. Para isto, o sistema realiza um procedimento de busca local, ajustando as rotas às mudanças verificadas durante a operação. Os autores fazem apenas uma simulação sequencial, não considerando a operação concorrente dos veículos.

Atuando de modo distribuído e utilizando-se de negociação entre os agentes, Zeddini et al. (2008) propõe um modelo capaz de lidar com novas demandas e com remoção de demandas já conhecidas em DVRP. Nessa abordagem, foi proposto um agente mediador da negociação entre os agentes e os veículos, este agente é responsável pela atribuição da demanda proveniente dos clientes aos veículos. Para tanto, este agente mediador faz um controle centralizado, necessitando de uma visão global do estado corrente dos agentes clientes e veículos.

Aplicando agentes em um problema dinâmico de coletas e entregas, Wojtusiak, Warden e Herzog (2011) utilizam-se de um modelo de *learnable evolution* para lidar com novas requisições conhecidas apenas após o planejamento inicial da rota. Esse modelo preocupou-se com o fluxo (regular ou reverso) de contêineres.

Utilizando agentes como mecanismo de negociação autônoma, esses podem alcançar uma negociação simples e ágil, viabilizando a utilização de técnicas que resultem em acordos eficientes, sem atrasos, mesmo em situações onde existam mudanças dinâmicas no ambiente (KRAUS; WILKENFELD; ZLOTKIN, 1995). Os autores levam também em consideração as restrições de tempo envolvidas durante o processo de negociação. De fato, Kraus, Wilkenfeld e Zlotkin (1995) identificam algumas características que precisam estar presentes nos protocolos de negociação, de modo que um protocolo deste tipo precisa ser: distribuído, instantâneo, eficiente, simples, simétrico, estável e acessível.

Enfim, pode-se afirmar que em um processo de negociação qualquer existe um bem a ser vendido ou um serviço a ser contratado, sendo  $O$  o objeto da negociação. Em um MAS, múltiplas negociações podem ocorrer simultaneamente, de modo que  $O$  pode ser entendido como um conjunto de  $i$  objetos negociados ( $O = \{o_1, \dots, o_i\}$ ).

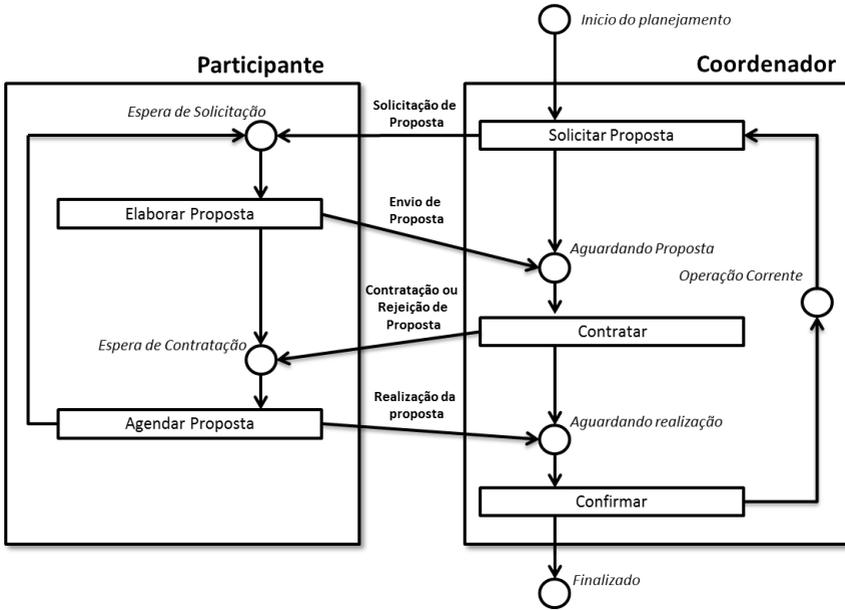
Cada negociação é iniciada por uma entidade que envia convites a  $j$  empresas potencialmente interessadas em participar da negociação de  $i$  objetos, logo,  $C_i = \{c_1, \dots, c_j\}$  é o conjunto de  $j$  empresas potencialmente interessadas no objeto  $i$ . Porém, apenas as  $k$  empresas (sendo  $k < j$ ) estão efetivamente interessadas em fazer propostas e entram no conjunto  $B = \{b_1, \dots, b_k\}$  de propostas candidatas a vencerem a negociação. A comunicação entre os agentes pode ser representada através da *Agent Unified Modeling Language* (AUML), a qual estende a *Unified Modeling Language* (UML), comumente utilizada na modelagem de sistemas (ODELL; PARUNAK; BAUER, 2001).

Neste trabalho foi feito uso do mecanismo de redes de contrato, este mecanismo de negociação proposto por Smith (1980). Nele, um agente que deseja resolver algum conflito lança um pedido por propostas para outros agentes que possivelmente estejam interessados em ajudá-lo. Após receber as propostas, esse agente escolhe a melhor proposta e confirma ao vencedor sua decisão (estabelecendo-se o contrato). Dentro deste processo, o agente que inicia a negociação também informa a rejeição aos agentes com propostas que foram descartadas. Este mecanismo possibilita a distribuição do controle e dos dados entre os agentes envolvidos na negociação, permitindo que diferentes alvos possam ser buscados por cada um e evitando a ocorrência de gargalos (SMITH, 1980).

A implementação da comunicação entre os agentes numa rede de contratos é ilustrada na figura 8, onde os agentes que assumem o papel de coordenação são responsáveis pela negociação e, os agentes participantes elaboram propostas e definem a alocação dos recursos às operações planejadas (LAU et al., 2006). Numa rede de contratos, cada agente pode assumir ora o papel de coordenador, ora o papel de participante numa negociação. A negociação entre os agentes produz acordos compatíveis com o interesse de cada agente.

A implementação da comunicação entre os agentes numa rede de contratos é ilustrada na figura 8, onde foi implementado um mecanismo de negociação inspirado no trabalho de Lau et al. (2006), nele, os autores propuseram um mecanismo distribuído para coordenação de redes de suprimento. Neste trabalho onde os agentes que assumem o papel de coordenação são responsáveis pela negociação e, os agentes participantes elaboram propostas e definem a alocação dos recursos às operações planejadas. Numa rede de contratos, cada agente pode assumir ora o papel de coordenador, ora o papel de participante numa negociação. A negociação entre os agentes produz acordos compatíveis com o interesse de cada agente.

Figura 8 – Diagrama de transição de estados de uma rede de contratos.



Fonte: Lau et al. (2006).

Ao realizar uma negociação, um agente deve-se determinar quais recursos devem ser alocados para a realização das atividades negociadas. Para isto, a contratação de uma operação segue quatro fases:

- Solicitação de proposta: para cada operação, os agentes de coordenação solicitam propostas para todos os agentes participantes;
- Elaboração da proposta: os agentes participantes que são capazes de realizar a operação enviam suas propostas informando, dentre outras coisas, o tempo e o custo necessários;
- Avaliação da proposta: todas as propostas recebidas pelo agente de coordenação são avaliadas, informando-se aos agentes participantes se devem reservar seus recursos ou não; e
- Finalização do agendamento: quando as operações produtivas negociadas tiverem sido atribuídas, a negociação deve então ser finalizada.

### 4.3 FERRAMENTAS MULTIAGENTES

Para o desenvolvimento de um MAS, é comum fazer uso de ferramentas que simplificam a criação dos agentes. Essas proveem bibliotecas, aplicativos de monitoramento, dentre outros recursos; isso exige o desenvolvedor de pensar em todos os aspectos que giram ao redor dos agentes, por exemplo, o controle da concorrência entre *threads*<sup>2</sup>.

Durante a realização desta pesquisa foram identificadas várias ferramentas multiagentes que podem ser organizadas em dois grupos: *i*) as que são dedicadas à simulação de MAS e *ii*) as que permitem a criação de MAS capazes de atuar como *middleware* na automação de atividades operacionais. As ferramentas de ambos os grupos permitem a elaboração, análise e validação de modelos baseados em agentes; todavia, apenas o segundo grupo podem integrar-se ao ambiente operacional, permitindo a integração aos sistemas corporativos.

Nikolai e Madey (2009) examinam as ferramentas de MAS de acordo com as seguintes características: linguagem de programação para modelagem, sistema operacional requerido, tipo de licença, principal aplicação e suporte disponível. Como o presente trabalho é voltado a desenvolver um sistema multiagentes para roteirização dinâmica de veículos, foram verificadas quais dessas utilizavam a linguagem Java (amplamente utilizada); quais possuíam pelo menos uma comunidade de desenvolvimento ativa, estando, por conseguinte, em processo contínuo de aperfeiçoamento e atualização; e quais proviam código aberto e algum tipo de suporte. O suporte técnico é um critério importante para a escolha da ferramenta, uma vez que dúvidas e problemas podem surgir durante o desenvolvimento de novas aplicações.

De acordo com Nikolai e Madey (2009), as ferramentas capazes de criar sistemas multiagentes relevantes para a presente pesquisa, são: Brahms, Cormas, Cougaar, Jade, Madkit, Magsy, Moduleco, oRIS, e SDML. Destas, Cormas, Magsy, oRIS, e SDML, não utilizam java; Brahms, Cormas, Moduleco, e SDML não possuem uma comunidade de desenvolvimento ativa; e Magsy e oRIS não abrem o código fonte da ferramenta. Desta maneira, apenas as ferramentas Madkit e Jade atenderam aos requisitos inicialmente estabelecidos.

Na plataforma MadKit, desenvolvida inicialmente por Gutknecht

---

<sup>2</sup>Uma thread pode ser definida como uma linha de execução de comandos de um programa. Em um MAS, várias threads podem coexistir, sendo estas executadas em paralelo ou não, cada thread é responsável pela realização de um conjunto de operações. Em Java, a criação de threads dá-se pela implementação da classe abstrata Thread.

(2001) e atualmente suportada por um grupo pequeno de desenvolvedores voluntários, os agentes são organizados em grupos com papéis específicos. É disponibilizada sob licença GNU GPL, que garante os direitos de distribuir o sistema, acessar aos códigos fontes, fazer melhorias, incorporar o *software* em sistemas proprietários e de redistribuir as melhorias implementadas. O suporte a esta ferramenta é feito através de um fórum de discussão e não existem histórico de *emails* trocados em listas de discussão.

Por sua vez, Jade (Java Agent Development Framework) é um *framework* implementado em Java para a programação de sistemas baseados em agentes. Por possuir ferramentas que auxiliam o desenvolvimento destes sistemas, pode também ser visto como uma plataforma. Desenvolvido em 2003 pelas empresas Motorola e Telecom Italia, é suportado pela Telecom Italia com a participação de outras entidades privadas e públicas (JADE, 2013). Este *framework* é licenciado sob a *Lesser General Public License* (LGPL) que também garante os direitos de distribuir o sistema, acessar aos códigos fontes, fazer melhorias, incorporar o *software* em sistemas proprietários e de redistribuir as melhorias implementadas. A comunidade que mantém a plataforma é ativa, e conta com: fóruns, listas de *e-mail*, interface para alerta de erros, lista de coisas a fazer, etc.

Ao comparar as duas plataformas acima, observa-se que a plataforma Jade possui uma comunidade mais ativa, viabilizando assim um suporte mais ágil. O suporte financeiro de empresas ao Jade também oferece mais segurança de que este terá continuidade e de que não haverá interrupção durante a realização deste trabalho. Além disso, a observância de padrões de mercado, como o FIPA (para troca de mensagens entre os agentes), e a possibilidade de integração via web services são também fatores favoráveis à sua seleção.

Outro aspecto positivo consiste no fato de a Jade ser utilizada em vários trabalhos acadêmicos, o que não acontece com a MadKit, *e.g.* nos trabalhos de Karageorgos et al. (2003), Jiao, You e Kumar (2006), Long, Lin e Sun (2011); por institutos de pesquisa, *e.g.* Telecom Italia LAB, Whitestein Technologies AG, Fraunhofer IITB, etc.; e em aplicações comerciais de simulação, *e.g.* Rockwell Automation, Singular Software SA, etc. A sua larga utilização do Jade a torna potencialmente interessante, pois pode contar com a maturidade obtida a partir da experiência de participação de diferentes entidades e pesquisadores especialistas no tema.

Dado o exposto acima, optou-se pela utilização da plataforma Jade para o presente estudo. Vale ressaltar que o cumprimento das

especificações FIPA pela ferramenta Jade contribui para que esta se comunique com outros sistemas que também obedecem aos padrões. As principais extensões desenvolvidas para a plataforma Jade foram apresentadas no quadro 6.

Quadro 6 – Principais extensões da plataforma Jade.

Extensão	Função	Desenvolvedor
Leap	Permite utilizar a Jade em aparelhos celulares	Comunidade Jade
Semantics	Permite aos agentes utilizar uma linguagem semântica para comunicar-se	Empresa France Telecom
WSIG	Permite expor o comportamento de agentes como web services	Comunidade Jade
Inter-platform mobility	Permite adicionar a característica de mobilidade aos agentes	Universidade Autonoma de Barcelona
Comunicação via SOAP	Permite utilizar o protocolo SOAP ao invés do HTTP para enviar mensagens entre agentes	Instituto MTA SZ-TAKI
Interpretação de ontologias	Permite aos agentes compartilhar uma mesma semântica	Universidade Erlangen-Nuremberg
Integração com Spring	Permite integrar os agentes ao contexto de aplicações Spring	Empresa Integrasco

Ainda, conforme especificado pelo FIPA, um serviço de páginas amarelas é implementado na Jade como um agente “Directory Facilitator”. Este permite que sejam realizadas pesquisas sobre as funcionalidades dos agentes ativos na plataforma, podendo ser utilizado para reduzir o excesso de mensagens na rede (*overhead*). Já o agente “Agent Management System” é responsável pelo gerenciamento do ciclo de vida dos agentes na plataforma, controlando ainda os identificadores dos agentes (*Agent Identification* — AID) na plataforma.

Ao usar a plataforma Jade, é possível adaptar o modelo conceitual proposto para que possa funcionar como um *middleware* junto aos sistemas das empresas. Diferentes estudos têm feito uso desta plataforma, destaca-se aqui os trabalhos de Karageorgos et al. (2003), Jiao, You e Kumar (2006) e Long, Lin e Sun (2011).

#### 4.4 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS MULTIAGENTES

A simulação baseada em agentes (conhecida como *Multi-Agent Based Simulation* — MABS) é uma técnica de simulação que faz uso de agentes em modelos de simulação para resolver problemas complexos (TIAN; TIANFIELD, 2006). Em geral é impossível prever o resultado do comportamento destes agentes na fase de modelagem, sendo preciso simulá-lo num ambiente controlado. Neste tipo de simulação, os agentes podem desempenhar diferentes papéis, de acordo com os comportamentos requeridos (DAVIDSSON et al., 2005).

Segundo Fujimoto (2000), o tempo em MABS pode ser compreendido de três maneiras diferentes: *i*) tempo físico: tempo real, ou tempo em que os eventos devem acontecer na realidade; *ii*) tempo de simulação: tempo de execução do modelo simulado; e *iii*) tempo do relógio de parede: tempo consumido pela máquina que realiza a simulação.

Vale ressaltar que os eventos no tempo físico podem progredir de maneira discreta e orientada a eventos, ou discreta e com intervalos de tempos regulares (SCHULDT, 2011). Quando o controle do tempo físico simulado é realizado à medida que os eventos ocorrem, a simulação é conhecida como *discrete event simulation*, mas quando é realizado a partir de um incremento constante no tempo físico, define-se *discrete time progression*. Neste segundo caso, os eventos recebidos são mapeados dentro de cada intervalo de tempo de maneira a controlar o ritmo da simulação (BANKS et al., 2004). No presente trabalho, a progressão de tempo utilizada foi a *discrete event simulation*, onde o controle dos eventos é feito na medida em que estes ocorrem.

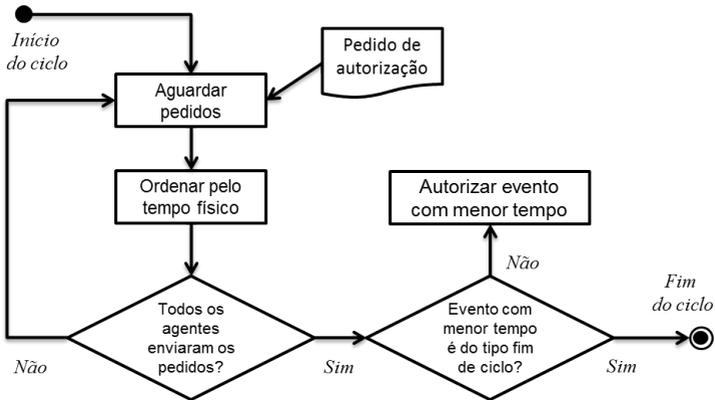
Como discutido na seção 4.3, o fato dos agentes serem simulados em *threads* faz que eles possam executar vários comandos de modo simultâneo. Isso acarreta em os agentes avançarem no tempo físico de acordo com o tempo que o processador leva para executar cada *thread*. Logo, um agente pode estar próximo do fim de sua operação, enquanto outro agente pode não executar nenhuma ação, permanecendo inerte no seu tempo físico. Assim, agentes podem ter tempos físicos muito diferentes, o que gera um problema grave, porque num ambiente multiagente espera-se que os agentes se comuniquem a fim de resolver problemas complexos durante as operações. Por isso, um MABS precisa cuidar do progresso dos agentes no tempo físico, não permitindo anomalias operacionais, como um agente se comunicando com outro que tem possui um tempo físico incoerente. Esta questão de gerenciamento de eventos simulados que ocorrem paralelamente é denominada simula-

ção de eventos discretos paralelos (ou *parallel discrete event simulation* (FUJIMOTO, 2000)).

De acordo com Fujimoto (2000), as abordagens utilizadas para lidar com esse tipo de simulação podem ser do tipo otimista ou conservadora. As abordagens otimistas não restringem a execução dos processos, de maneira que estes acontecem livremente até que uma mensagem de alerta seja recebida. Nesse caso, o sistema deve retornar os agentes em conflito ao momento em que o alerta ocorreu. A vantagem do sistema otimista é que este possui uma execução mais eficiente da simulação. Por sua vez, na abordagem conservadora, uma entidade de coordenação recebe os estados de todos os agentes, os ordena no tempo e vai autorizando a sua liberação na medida em que novas solicitações de processamento de eventos chegam. Nessa abordagem, evita-se que problemas de concorrência aconteçam, não necessitando retornar a estágios anteriores (FUJIMOTO, 2000).

Como neste trabalho os agentes podem negociar durante toda a operação, armazenar os diferentes estados de todos os veículos durante o ciclo operacional necessitaria de um grande esforço computacional, inviabilizando assim a utilização da abordagem otimista. Assim, foi utilizada a abordagem de sincronização conservadora, como pode ser observada na figura 9, onde os agentes precisam receber autorização para seguir adiante com o processamento de suas tarefas. Assim, as autorizações são enviadas aos agentes até que todos os veículos tenham encerrado suas operações. Quando isto acontece, o ciclo é finalizado e dá-se início a um novo ciclo. Nesta implementação, os agentes veículos, ao encerrar suas operações, enviam uma solicitação do tipo “evento de fim de ciclo” com um tempo extremamente alto, assim, após ordenação, as mensagens deste tipo ficam no final da lista de solicitações. Quando restarem apenas solicitações do tipo “evento de fim de ciclo”, significa que os veículos encerram suas operações e o ciclo deve ser finalizado.

Figura 9 – Fluxo de mecanismo de sincronização conservadora implementado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo descreve a pesquisa realizada, fornecendo uma descrição das etapas de desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são apresentados alguns trabalhos científicos que estão relacionados com o tema (Seção 5.1), apresentando as principais características desses e os diferenciais deste trabalho. Após a revisão da literatura, é apresentada a modelagem, destacando os métodos heurísticos utilizados (Seção 5.3.1), seguindo-se das estratégias de colaboração que foram avaliadas pelo modelo (Seção 5.3.2). Para a avaliação das estratégias foram determinados os indicadores de desempenho observando sugestões de indicadores presentes no modelo SCOR (Seção 5.3.3). A modelagem do MAS (Seção 5.3.4) e a especificação da região de atuação (Seção 5.3.5) também estão presentes. Os aspectos técnicos envolvidos na implementação do modelo (Seção 5.4) apresentam: a estrutura de agentes (Seção 5.4.1), o banco de dados (Seção 5.4.2), o desenvolvimento do MAS (Seção 5.4.3), o sistema de gerenciamento dos resultados (Seção 5.4.4) e os parâmetros utilizados no modelo (Seção 5.4.5). Por sua vez, é apresentada a lista dos experimentos e dos cenários que foram simulados (Seção 5.5). Finalizando este capítulo, a seção 5.6 apresenta os resultados obtidos com a simulação do modelo.

### 5.1 REVISÃO DA LITERATURA

O ambiente dinâmico em que as empresas operam, onde mudanças na economia, novas tecnologias e tendências de consumo mudam rapidamente, requer das empresas agilidade e flexibilidade para lidar com situações críticas causadas por estas mudanças e eventos inesperados. Estes novos requisitos propiciaram o surgimento de sistemas de controle distribuídos e inteligentes, provendo a adaptabilidade e a agilidade requerida pelas empresas. Neste cenário, o conceito de agentes vem sendo estudado nos últimos vinte anos, e apresenta-se promissor no que diz respeito à consideração de tais requisitos. Abordagens baseadas em agentes são adequadas para o gerenciamento das operações de transporte (DAVIDSSON et al., 2005); exemplos de aplicações de agentes nessa área podem ser observados nos estudos de Fox, Barbuceanu e Teigen (2000), Julka, Srinivasan e Karimi (2002), Karageorgos et al. (2003), Roorda et al. (2010), Vokrinek, Komenda e Pechoucek (2010), e Maciejewski e Nagel (2012).

Sem levar em conta as cargas de trabalho dinâmicas existentes em cada início de operação, planejamentos e programações podem alcançar resultados não ótimos, ou mesmo, resultados que invalidem a realização do serviço desejado em tempo de execução (SHEN; WANG; HAO, 2006). Assim, para solucionar tais problemas dinâmicos, comumente recorre-se ao uso de heurísticas — técnicas de resolução de problemas que não garantem a solução ótima, mas que alcançam bons resultados em menor tempo computacional, se comparadas com métodos que buscam a solução ótima. Pode-se perceber que, em geral, modelagens que resultam em soluções ótimas possuem sérias limitações que restringem a sua adoção: requerem um alto volume de informação a priori, são sensíveis à variação da informação e, o tempo requerido para encontrar a solução ótima é, em geral, muito elevado (MES; HEIJDEN; HARTEN, 2007).

Ao tratar especificamente os métodos de otimização aplicáveis aos problemas convencionais de roteirização, normalmente, estes não são capazes de lidar com as mudanças percebidas durante a realização do roteiro. Para abordar estas questões, uma classe de problemas, conhecida como Problemas de Roteirização Dinâmica de Veículos (DVRP), tem sido estudada (PILLAC et al., 2013). Os DVRP preocupam-se com a existência de incidentes durante a operação e, assim, requerem um tempo de resposta quase que imediato para realizar intervenções durante a realização de uma rota. Associado ao DVRP, a aplicação da abordagem de agentes faz com que estes precisem lidar com os diversos incidentes que possam surgir em tempo adequado, por exemplo, criando e ajustando rotas no tempo disponível. Para tanto, agentes podem fazer uso de pesquisa operacional, reagindo a estes eventos de maneira paralela e distribuída. De acordo com Crainic, Gendreau e Potvin (2009), essa abordagem distribuída permite responder eficientemente a mudanças no ambiente operacional, reagindo prontamente a tais eventos.

Davidsson et al. (2005) observaram que o uso de agentes na tomada de decisão estratégica em transporte de cargas é uma área pouco estudada. Os autores afirmaram ainda que as aplicações de agentes neste campo de pesquisa possuem baixo grau de maturidade; isto é, os modelos identificados estão distantes de serem utilizados operacionalmente em empresas. Em geral, problemas de DVRP são solucionados através de heurísticas e meta-heurísticas, contudo, poucas pesquisas tem feito uso de agentes a esses problemas (ZEDDINI et al., 2008).

Diferentemente da formulação clássica do problema de roteirização de veículos, aplicações mais realísticas de roteirização de veículos

precisam lidar com alterações nas informações utilizadas para o planejamento inicial das rotas. De acordo com Pillac et al. (2013), os avanços tecnológicos têm contribuído para o surgimento de aplicações de roteirização em tempo real, tais aplicações permitem o gerenciamento e o acompanhamento online da frota. Para tanto, uma estratégia comumente adotada é a utilização de informações produzidas por GPS e de sistemas de informações geográficas, viabilizando assim, uma percepção espacial das operações de transporte realizadas.

A fonte de dinamismo mais frequentemente estudada é a chegada de novas requisições durante as operações, sendo estas caracterizadas por novas demandas de produtos ou serviços (PILLAC et al., 2013). Entretanto, outras variáveis estocásticas podem ser inseridas dentro do problema, *e.g.* Novaes, Burin e Bez (2012) desenvolveram um modelo de detecção de falhas que considera a identificação de congestionamentos. Outras aplicações sugerem a verificação de disponibilidade ou não de veículos, incluindo possíveis quebras de veículos durante a operação (LI; MIRCHANDANI; BORENSTEIN, 2009; MU et al., 2011).

Numa outra aplicação realizada por Maciejewski e Nagel (2012), os autores propuseram um sistema de otimização baseado em agentes para a alocação de tarefas conhecidas inicialmente. Para isto, o sistema realiza um procedimento de busca local, ajustando as rotas às mudanças verificadas durante a operação. Os autores fazem apenas uma simulação sequencial, não considerando a operação concorrente dos veículos.

Atuando de modo distribuído e utilizando-se de negociação entre os agentes, Zeddini et al. (2008) propuseram um modelo capaz de lidar com novas demandas e com remoção de demandas já conhecidas em DVRP. Nessa abordagem, foi proposto um agente mediador da negociação entre os clientes e os veículos, este agente é responsável pela atribuição da demanda proveniente dos clientes aos veículos. Para tanto, este agente mediador faz um controle centralizado, necessitando de uma visão global do estado corrente dos agentes clientes e veículos.

Aplicando agentes em um problema dinâmico de coletas e entregas, Wojtusiak, Warden e Herzog (2011) utilizam-se de um modelo de *learnable evolution* para lidar com novas requisições conhecidas apenas após o planejamento inicial da rota. Esse modelo preocupou-se com o fluxo (regular ou reverso) de contêineres. Dois aspectos importantes para determinar o grau de dinamismo dos DVRP são o tempo disponível e a quantidade de eventos recebidos após o planejamento inicial (LARSEN; MADSEN; SOLOMON, 2002), com este conceito é possível determinar a dificuldade em lidar com determinados problemas.

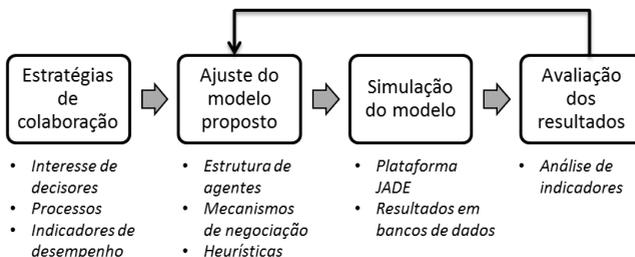
Esse indicador varia entre 0 (puramente estático) e 1 (puramente dinâmico), mais informações sobre como este indicador é obtido e ainda sua aplicação em problemas com janelas de tempo podem ser obtidas no trabalho de Larsen, Madsen e Solomon (2002).

Assim, este trabalho diferencia-se dos demais por investigar estratégias de colaboração em sistemas multiagentes para resolver um problema de roteirização dinâmica de veículos. Neste trabalho foi realizada uma aplicação no contexto de uma indústria montadora (seção 5.3), onde operadores logísticos são utilizados para realizar coletas em diferentes fornecedores e entregar os componentes coletados no depósito a indústria montadora. Para isto, o modelo de sistema multiagente proposto (seção 5.4) deve garantir que os agentes possam colaborar a fim de equacionar problemas existentes neste cenário, quais sejam: coordenação entre diferentes atividades, integração entre os diversos sistemas de informações envolvidos, existência de variadas políticas de negociação em cada empresa, ocorrência de eventos não planejados e necessidade de lidar com falhas.

## 5.2 PROPOSIÇÃO DO MÉTODO

A utilização do modelo proposto neste trabalho não é uma atividade simples, exigindo competências multidisciplinares. Para facilitar o entendimento e sua utilização, é proposto um método para a aplicação do modelo de avaliação das estratégias de colaboração. O funcionamento deste método é ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Método proposto para avaliação de estratégias de colaboração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O método inicia com a identificação das estratégias de colaboração que devem ser testadas, definindo-se regras e diretrizes para o funcionamento da simulação. Estas podem ser obtidas de diferentes maneiras, devendo ser escolhidas de acordo com os interesses daqueles que tomam as decisões na empresa. As estratégias podem envolver mudanças nos processos empresariais, alterando a maneira de se realizar as atividades. Para indicar as melhores estratégias, devem ser escolhidos indicadores de desempenho capazes de avaliar os resultados de acordo com os interesses previamente estabelecidos.

Definidas as estratégias de colaboração, é necessário ajustar o modelo aqui proposto para que este contemple as estratégias nos processos empresariais. Para tanto, foi utilizada neste trabalho a metodologia Prometeus, esta é voltada para o desenvolvimentos de sistemas baseados em agentes, o desenvolvimento documentado auxilia o desenvolvedor na realização de mudanças no modelo inicial. Nesta etapa devem ser estabelecidos os diferentes comportamentos para os agentes, os métodos de negociação a serem utilizados entre os agentes e, as técnicas de otimização que podem ser necessárias (programação matemática, heurísticas, meta-heurísticas, dentre outras).

Após definido o modelo, este necessita ser simulado. Para isto, utilizou-se neste trabalho a plataforma Jade, através desta plataforma os agentes podem ser postos em execução. A implementação dos agentes é realizada na linguagem Java, obedecendo aos conceitos da programação orientada a objetos, como herança e polimorfismo, de maneira que um agente pode herdar comportamentos de outro agente. Este conceito pode ser observado na seção 5.4.

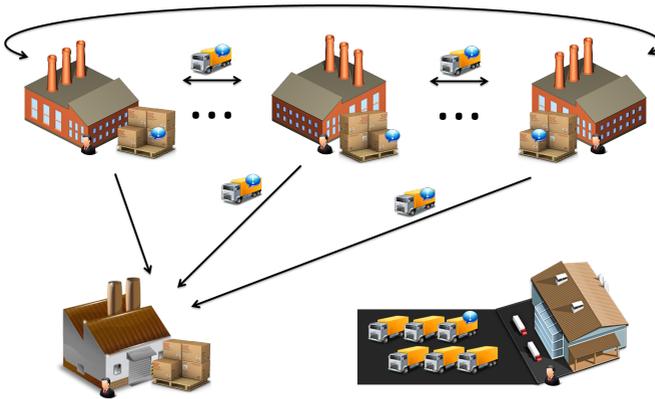
Por fim, os resultados obtidos na simulação são avaliados de acordo com os indicadores previamente definidos no início do método. Caso os resultados não tenham atingido os interesses dos decisores, novos ajustes podem ser precisos no modelo. Para a obtenção dos indicadores, foi desenvolvido um sistema para gerenciar os dados obtidos durante a simulação.

Outros problemas, como o de distribuição de cargas, pode fazer uso de conceitos apresentados neste trabalho. Entretanto, novas aplicações requerem ajustes na modelagem, a fim de modelar adequadamente os processos envolvidos. Deste modo, tanto a estrutura dos agentes, quanto o mecanismo de negociação, e as estratégias de colaboração precisam ser repensadas. Apesar disso, a definição da região de atuação pode ser mantida, uma vez que a estratégia de criação de rotas é muito semelhante a diferentes problemas, podendo ser facilmente estendida para incorporar outros requisitos de novos problemas.

### 5.3 MODELAGEM DE APLICAÇÃO EM EMPRESAS OEM

A coleta de componentes em empresas OEM, no caso deste trabalho, lida com produtos de alto valor agregado, de maneira que diferentes visitas precisam ser realizadas a fim de coletar produtos intermediários (ou componentes) ao longo da cadeia (Figura 11). Após coletados em uma determinada área, esses produtos são transportados para a indústria montadora, que realizará a produção final das mercadorias que serão consumidas pelos clientes. Em razão do elevado grau de aleatoriedade das variáveis consideradas durante a operação das rotas pelos veículos próprios, serão investigadas estratégias de colaboração para lidar com os possíveis eventos dinâmicos presentes nestas operações.

Figura 11 – Processo distribuído de tomada de decisão em um problema de coleta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta aplicação, as rotas são inicialmente planejadas de forma estática, admitindo-se condições normais de operação. A cada ciclo (isto é, a cada dia de operação) o transportador responsável dá início à sua operação informando aos veículos próprios e ao transportador auxiliar (caso este exista) que um novo ciclo deve ser iniciado. Por sua vez, os transportadores auxiliares devem encaminhar aos veículos auxiliares a autorização para início do ciclo. Os roteiros de coleta dos veículos próprios e auxiliares iniciam-se no depósito da empresa montadora, onde estes estão estacionados.

A atividade de coleta nos fornecedores da cadeia de suprimentos

é programada para uma data específica, sem a observação de horário para a realização da atividade. Assim, os componentes coletados serão utilizados apenas no dia seguinte pela empresa OEM. Deste modo, a transportadora pode obter ganhos com a realização de ajustes das rotas inicialmente estabelecidas, ajustando-se assim a eventos dinâmicos desconhecidos no início das operações, reduzindo o impacto de tais eventos dinâmicos no resultado final do roteiro.

Observa-se que a não viabilidade da execução de uma tarefa só é verificada ao longo do processo, ou seja, após iniciado o roteiro de coletas. Para tratar adequadamente os eventos dinâmicos detectados durante a execução da rota, os agentes devem garantir respostas autônomas aos eventos logo que estes ocorram; uma resposta ágil a eventos não planejados evita situações não desejadas, *e.g.* coletas não realizadas ao fim do ciclo diário. Assim, a cada visita realizada, o agente veículo realiza um teste estatístico (SPRT) para verificar a condição de congestionamento. Ao detectar um congestionamento, o agente veículo reduz a velocidade estimada para completar o restante do roteiro; nesse caso, possivelmente o agente veículo tenha de transferir parte de suas tarefas restantes para outros veículos disponíveis.

### 5.3.1 Métodos heurísticos

Dentre as soluções para roteirização de veículos, discutidas no capítulo 3, foram identificadas e testadas soluções heurísticas para a construção inicial dos roteiros, para a elaboração das propostas e para o ajuste de rotas. Os testes permitiram avaliar que heurísticas produzem resultados satisfatórios em tempo computacional razoável, considerando o problema de roteirização dinâmica de veículos. Para fins de simplificação, considerou-se que todos os veículos possuem as mesmas características.

Neste trabalho, optou-se pela utilização de um método heurístico composto — detalhado na seção 3.3.4 — para o planejamento inicial do roteiro, este gerou os roteiros pela heurística de inserção do mais distante (Seção 3.3.2), e em seguida melhorando-os pela heurística 3-opt (Seção 3.3.3). A escolha desta heurística foi realizada com base no trabalho de Burin (2011), este verificou que esta heurística produz bons resultados para o problema de coleta em empresas OEM.

Já para a elaboração das propostas e ajuste das rotas, foi utilizado a heurística 3-opt, com esta é possível verificar o impacto da inserção de uma nova tarefa em uma rota já existente, para tanto, a

nova tarefa é inserida ao final do roteiro existente antes de executar o 3-opt.

Esses métodos precisam ser utilizados pelos veículos durante a realização de suas rotas, quando estes enfrentam situações não previstas inicialmente, e que interferem na viabilidade da rota original.

### 5.3.2 Estratégias de colaboração

Dentre as alternativas testadas, pode-se citar o uso ou não dos veículos próprios no processo de negociação e a utilização de um sistema suplementar em que veículos auxiliares (próprios ou de terceiros) são acionados para realizarem tarefas excedentes sempre que necessário. As tarefas de coletas que não possam ser executadas pelos veículos próprios são problemas operacionais que devem ser previstos e corrigidos, uma vez que impactam negativamente o nível de serviço oferecido aos clientes.

#### 5.3.2.1 Utilização de veículos auxiliares

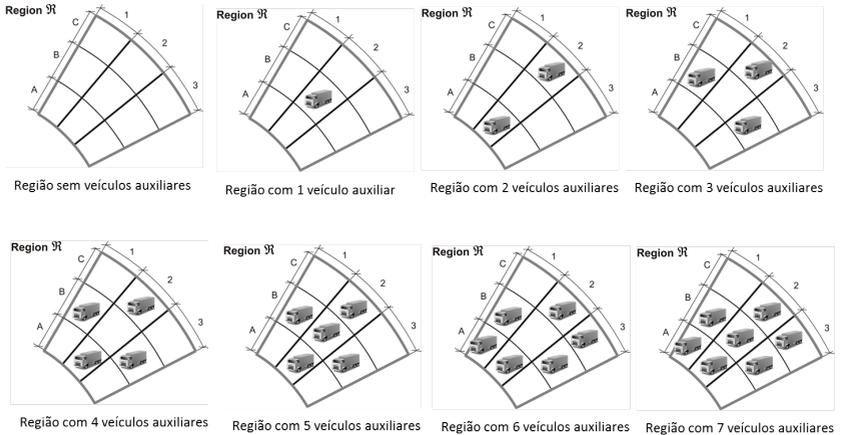
O uso de veículos auxiliares modela uma situação frequentemente observada nas empresas, onde se utiliza primariamente uma frota própria para atender à demanda regular e, para lidar com elevações eventuais na demanda, dispõe-se de veículos auxiliares contratados de acordo com a necessidade.

Os veículos de terceiros (ou auxiliares) iniciam sua rota no depósito, mas se deslocam imediatamente para locais determinados dentro do distrito, sendo distribuídos de modo equilibrado na rede (como ilustrado na figura 12). Após realizarem a rota de coleta, os veículos retornam ao depósito, entregando os componentes coletados à indústria montadora.

#### 5.3.2.2 Negociação entre veículos

Para a realização de negócios durante as operações, um agente que decide transferir uma tarefa de coleta que lhe foi atribuída precisa escolher uma proposta dentre as disponíveis, preparadas por agentes candidatos a receber tal tarefa. A negociação foi modelada com prioridade sobre todas as outras tarefas que são agendadas no mecanismo de sincronização (descrito na seção 4.4), pelo fato desta ser autônoma-

Figura 12 – Exemplo dos deslocamentos iniciais dos veículos auxiliares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

mente realizada num intervalo de tempo pequeno. Assim, quando os agentes entrarem em negociação, eles param de realizar tarefas operacionais, simulando um processo de negociação autônomo e ágil que, apesar do atraso ocasionado pelo trânsito de mensagens na rede, é realizado num tempo bem inferior ao tempo de deslocamento ou atendimento.

Nesta aplicação, os veículos que negociam as tarefas assumem o papel de coordenadores dessa negociação e, os outros veículos, de participantes, como numa rede de contratos (Seção 4.2). Todos os veículos ativos podem participar da negociação de uma tarefa, mas apenas enviam propostas aqueles com tempo disponível e que ainda não retornaram ao depósito. Cada veículo utiliza a heurística *3-opt* para prever o roteiro mais adequado da nova tarefa no roteiro restante. Uma vez que os veículos candidatos obtêm uma rota satisfatória, é calculada uma proposta para esta nova tarefa, e então essa proposta é enviada ao veículo que negocia a tarefa.

A partir das heurísticas definidas na seção 5.3.1, foi possível definir, para cada um dos  $V$  veículos, uma rota  $R_v$ . Cada rota pode ser entendida como uma sequência de  $k$  visitas a serem realizadas.

Dado que diferentes veículos podem ser utilizados nas operações de roteirização, uma questão importante é definir que veículos participam da negociação, uma vez que a escolha dos veículos impacta na

quantidade de transferências possíveis. Neste trabalho apenas veículos próprios leiloam tarefas, mas quanto à participação nos leilões, foram testadas duas estratégias: uma onde apenas veículos auxiliares fazem propostas para as tarefas negociadas e outra em que tanto veículos próprios quanto auxiliares podem fazer propostas. A seleção adequada de veículos pode melhorar o desempenho da comunicação entre os agentes, uma vez que auxilia na redução do fluxo de mensagens na rede pela seleção mais criteriosa dos participantes de uma negociação.

Com respeito à seleção das tarefas para negociar, o agente veículo realiza um teste estatístico ao fim de cada  $j$ -ésima visita para verificar a capacidade de realizar o restante do roteiro. Para isto, primeiramente define-se  $\tau_j^{(h)}$  como o tempo observado acumulado desde o início da operação até à visita  $j$ , dado o cenário  $h$  — onde  $h$  pode ser 0 (sem congestionamento), ou 1 (com congestionamento). Sendo este definido por

$$\tau_j^{(h)} = t_{LH1} + \sum_{l=2}^j \left( t_{l-1,l}^{(h)} \right) + \sum_{l=1}^j (TS_l) \quad (5.1)$$

representando  $t_{LH1}$  o tempo computado de deslocamento entre o depósito e a primeira visita do roteiro,  $t_{l-1,l}^{(h)}$  o tempo computado de deslocamento entre a visita  $l-1$  e  $l$  considerando o cenário  $h$  e,  $TS_l$  o tempo de serviço computado no cliente  $l$ . O valor de  $\tau_j^{(h)}$  representa o tempo já computado, ou observado, para a realização da  $j$ -ésima visita.

Por sua vez, para medir o tempo necessário para a realização do roteiro restante em um cenário  $h$ , define-se a variável  $\omega_j^{(h)}$  da seguinte maneira

$$\omega_j^{(h)} = \sum_{l=j}^k \left( t'_{l,l+1}^{(h)} \right) + \sum_{l=j+1}^k (TS'_l) + t_{LH2} \quad (5.2)$$

onde  $k$  é o número de visitas planejadas inicialmente para do roteiro,  $t_{LH2}$  representa o tempo estimado de deslocamento entre a última visita do roteiro e o depósito,  $t'_{l,l+1}^{(h)}$  o tempo estimado de deslocamento entre a visita  $l$  e  $l+1$  considerando o cenário  $h$  e  $TS'_l$  o tempo de serviço estimado no cliente  $l$ .

Assume-se neste trabalho que todas as variáveis randômicas são

independentes. Graças ao Teorema do Limite Central, e para um  $k$  suficientemente grande, a variável  $\omega_j^{(h)}$  pode ser aproximada por uma distribuição normal. Assim, para um nível de significância de 98%, tem-se que o valor máximo esperado de  $\omega_j^{(h)}$  pode ser obtido por

$$\omega_j^{(max)} \cong E[\omega_j^{(h)}] + 2.06\sqrt{var[\omega_j^{(h)}]} \quad (5.3)$$

Deste modo, as equações 5.1 e 5.3, apoiam o veículo na verificação do tempo disponível, onde  $L$  representa a jornada de trabalho de cada veículo, isto é, o limite de tempo disponível para realização de cada rota. Desta maneira, se a condição apresentada na equação 5.4 é obedecida, então o veículo continua a realização da rota normalmente, caso contrário, o veículo inicia um processo de remoção de múltiplas tarefas até que a equação 5.4 seja satisfeita.

$$\tau_j^{(h)} + \omega_j^{(max)} < L \quad (5.4)$$

Diferentes processos de remoção podem ser implementados, Novaes, Burin e Bez (2012) investigaram duas opções diferentes de lidar com tais conflitos: a transferência das últimas visitas do roteiro e a transferência das visitas mais próximas do centro de massa da região de coleta. Os autores concluíram que a transferência pelo centro de massa tem melhores resultados, esta foi escolhida para compor as estratégias de negociação. Neste trabalho foi também utilizado o conceito de operador de remoção (GOEL, 2008), que trata da retirada de visitas de um roteiro, nessa abordagem, é feito um teste entre todas as visitas ainda não realizadas (sendo todas estas candidatas a remoção do roteiro), de maneira a descobrir aquela cuja exclusão traria maior economia, isto é, maior redução de distância no roteiro. Assim, pode-se verificar para cada tarefa  $t$  do roteiro  $R$ , qual o ganho obtido com a eliminação de uma tarefa  $t$  do roteiro, gerando, assim, um roteiro  $R^-$ . Deste modo, o ganho com a eliminação pode ser obtido com a equação 5.5, e as tarefas são excluídas do roteiro até que este seja potencialmente viável. Ressalta-se que, nesta proposta, os agentes reduzem seu roteiro sem a necessidade de consultar a nenhum outro agente, implicando assim em um processo mais ágil e autônomo. Entretanto, o conhecimento global das operações pelos veículos poderiam resultar em estratégias de negociação mais eficientes, envolvendo mais troca de informações e métodos de otimização mais precisos.

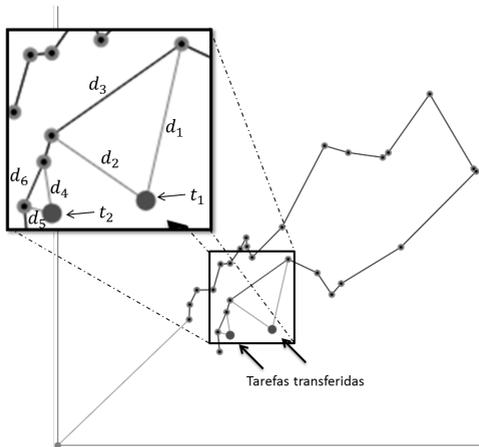
$$ganho(t) = \sum_{a \in R} (c_a) - \sum_{a \in R^-} (c_a) \quad (5.5)$$

A figura 13 ilustra a remoção de duas tarefas da rota ( $t_1$  e  $t_2$ ), onde o ganho com a remoção das duas tarefas removidas pode ser simplificada expresso, respectivamente, pelas equações 5.6 e 5.7.

$$ganho(t_1) = d_1 + d_2 - d_3 \quad (5.6)$$

$$ganho(t_2) = d_4 + d_5 - d_6 \quad (5.7)$$

Figura 13 – Exemplo de seleção de tarefas para transferência de acordo com o operador de exclusão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As propostas para as negociações avaliadas neste trabalho podem ser elaboradas de três formas: *a*) nova distância global do roteiro após a inserção; *b*) nova distância restante do roteiro após a inserção; e *c*) diferença entre a nova rota e a rota anterior.

No primeiro tipo de proposta, o veículo participante da negociação estima a nova distância total percorrida ao incluir o novo ponto negociado. Esta tática contribui para que haja um equilíbrio geral entre as rotas, uma vez que os veículos tendem a percorrer a mesma quilo-

metragem. Ao propor uma nova visita no roteiro original, numa nova aresta  $a_{k+1}$  é inserida no roteiro original  $R$  e, após aplicar a heurística 3-opt, têm-se um roteiro  $R^+$ . Deste modo, o valor da proposta  $bid1$  é calculada pela equação 5.8.

$$bid1 = \sum_{a \in R^+} (c_a) \quad (5.8)$$

No caso da nova distância restante do roteiro, o veículo não se preocupa com as visitas já realizadas, estimando a nova distância restante a ser percorrida. Esta acaba promovendo um equilíbrio apenas entre as rotas restantes mas, neste caso, eliminam-se as tarefas já realizadas do roteiro. Se considerarmos que  $a_p$  é a posição atual do veículo na rota  $R$ , o valor da proposta  $bid2$  é calculado pela equação 5.9.

$$bid2 = \sum_{i=p}^{k+1} (c_i) - \sum_{j=p}^k (c_j), a_i \in R^+ \text{ e } a_j \in R \quad (5.9)$$

Por fim, no terceiro caso, vence a negociação o veículo que tiver alguma visita a realizar mais próximo da visita em negociação. Assim, o sistema multiagentes acaba por reduzir a quilometragem global percorrida, não se preocupando com o equilíbrio de carga entre os agentes. Assim, o valor da proposta para esta alternativa ( $bid3$ ) é calculada pela equação 5.10.

$$bid3 = \sum_{a \in R^+} (c_a) - \sum_{a \in R} (c_a) \quad (5.10)$$

Dado que  $V$  representa o conjunto total de veículos no modelo, têm-se um limite máximo de  $V - 1$  candidatos para a negociação, entretanto, apenas veículos em condições de realizar as tarefas fazem propostas. Outros veículos também podem ser excluídos da negociação caso o *timeout*<sup>1</sup> da negociação seja atingido. Assim, o conjunto máximo de propostas pode ser definido como  $\{b_1, \dots, b_{V-1}\}$ , sendo formado pelos valores das propostas enviados pelos veículos candidatos.

Após o veículo que negocia sua tarefa receber as propostas dos veículos candidatos, ele terá de escolher a proposta vencedora. Dentre

---

<sup>1</sup>Timeout é o tempo limite estabelecido para que os veículos participantes da negociação realizem as propostas.

as possíveis formas de avaliação das propostas, optou-se neste trabalho por sempre escolher a de menor valor.

### 5.3.3 Indicadores de desempenho

O SCOR traz uma lista de indicadores de desempenho que podem ser utilizados para fins de gerenciamento dos processos voltados às empresas OEM. Alguns indicadores relacionados com os atributos custo e capacidade de resposta são apresentados no quadro 7, os quais correspondem aos indicadores SCOR de nível 2 (*configuration level*).

Selecionou-se para este trabalho indicadores relacionados com os atributos confiabilidade, custo e capacidade de resposta, apresentados resumidamente no quadro 7, os quais correspondem aos indicadores SCOR de nível 2 (*configuration level*). Neste trabalho, o indicador  $RL_{2,2}$  foi utilizado para a observação do percentual médio de visitas não realizadas, este indicador serviu para aferir o nível de serviço obtido em cada simulação. Outro indicador utilizado foi o  $CO_{2,4}$ , indicador que mede o custo médio total com as tarefas de coletas.

Quadro 7 – Principais indicadores de desempenho SCOR relacionados com a produção puxada.

Atributo	Código	Indicadores
Confiabilidade	$RL_{2,2}$	Percentual de pedidos atendidos na data estipulada ( <i>Delivery Performance to Customer Commit Date</i> )
Capacidade de resposta	$RS_{1,1}$	Tempo do ciclo de atendimento do pedido ( <i>Order Fulfillment Cycle Time</i> )
Capacidade de resposta	$RS_{2,2}$	Prazo de entrega ( <i>Delivery Cycle Time</i> )
Custo	$CO_{2,2}$	Custo de fornecimento ( <i>Cost to Source</i> )
Custo	$CO_{2,4}$	Custo de transporte ( <i>Cost to Deliver and/or Install</i> )

Fonte: SCC (2009).

### 5.3.4 Modelagem do MAS

As metodologias para desenvolvimento de sistemas baseados em agentes são recentes, e não existem padrões a serem seguidos ou implementados. Essas, em geral não são capazes de conduzir a análise

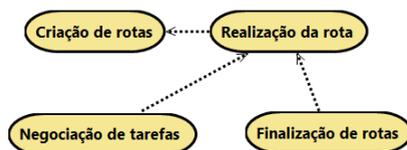
durante todo o processo de desenvolvimento de sistemas que contempla as fases de análise de requisitos, especificação, arquitetura, implementação, teste e documentação.

Para o desenvolvimento do MAS utilizado neste trabalho, adotou-se a metodologia Prometheus. Essa foi desenvolvida para sistemas baseados em agentes de propósito geral, isto é, não se limita a um modelo específico ou a uma determinada plataforma (PADGHAM; WINIKOFF, 2004). Essa metodologia proporciona um acompanhamento durante todo o ciclo de desenvolvimento do sistema. A metodologia Prometheus é estruturada em três etapas: especificação do sistema, desenho da arquitetura e detalhes de implementação. Como principais resultados, obtém-se os diagramas de objetivos, de cenários, de análise, de papéis, de agrupamento de papéis, de acoplamento de dados, e, por fim, de cada agente.

Na fase de especificação do sistema buscam-se identificar os principais objetivos e funcionalidades do sistema, com atenção a como as percepções do ambiente podem influenciar os agentes e, como estes agentes podem interferir no ambiente em que operam. Nesta etapa são definidos os cenários de caso de uso, objetivos e alvos do sistema e, ao final, o desenvolvedor deve possuir uma compreensão geral acerca do MAS projetado.

Conforme a figura 14, os objetivos identificados nesta fase estão relacionados à criação, realização e finalização das rotas. Além disso, o sistema deve garantir que agentes veículos próprios possam negociar tarefas de seus roteiros com outros agentes veículos. Estes objetivos fundamentam as principais aplicações da ferramenta (ou cenários), sendo apresentados no diagrama de cenário (Figura 15).

Figura 14 – Diagrama de objetivos da metodologia Prometheus.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama de análise (Figura 16) apresenta os principais comportamentos dos agentes envolvidos e como estes comportamentos se relacionam com os cenários identificados. Ainda, neste documento podem-se identificar os incidentes que afetam o comportamento dos

Figura 15 – Diagrama de cenários da metodologia Prometheus.



Fonte: Elaborada pelo autor.

agentes e, em que cenários estes podem ser verificados. Percebe-se, por exemplo, que no cenário de finalização de rotas, enquanto os agentes do tipo transportador responsável são responsáveis por enviar alertas, os agentes do tipo transportador auxiliar devem receber estes alertas. Outra informação importante que pode ser observada na figura 16 é a de que embora todos os veículos possam participar de negociações, apenas veículos próprios podem iniciar uma negociação.

Na etapa de desenho da arquitetura, os agentes que estão envolvidos no MAS são apresentados mais detalhadamente, de modo que cada papel desempenhado por um agente é observado individualmente (Figura 17). Destacam-se aqui a pertinência de comportamentos e as percepções do ambiente em cada papel desempenhado pelos agentes. Ao observar estes papéis, pode-se perceber que tanto agentes veículos próprios quanto agentes veículos auxiliares podem observar a existência de congestionamentos.

Determinados os papéis, estes são agrupados em torno dos agentes, como mostra a figura 18. Observa-se que os agentes do tipo veículo próprio podem representar os papéis de veículo próprio, veículo negociador (o que inicia uma negociação) e de veículo candidato (o que participa de uma negociação). Por sua vez, os agentes do tipo veículo auxiliar limitam-se a representar os papéis de veículo auxiliar e de veículo candidato.

Ainda nesta etapa pode-se ver como esses agentes usam os dados, de modo a entender quais agentes leem e quais agentes atualizam os dados (ver figura 19). Observa-se, por exemplo, que as informações de visitas planejadas são enviadas pelo agente transportador responsável ao agente veículo próprio; entretanto, durante a realização das visitas, a tabela de visitas executadas pode ser atualizada tanto por veículos próprios quanto por veículos auxiliares. Devido as negociações que podem ocorrer durante a operação destes veículos, os papéis de veículo negociador e candidato também podem atualizar os dados de visitas

Figura 16 – Diagrama de análise da metodologia Prometheus.



Fonte: Elaborada pelo autor.

executadas.

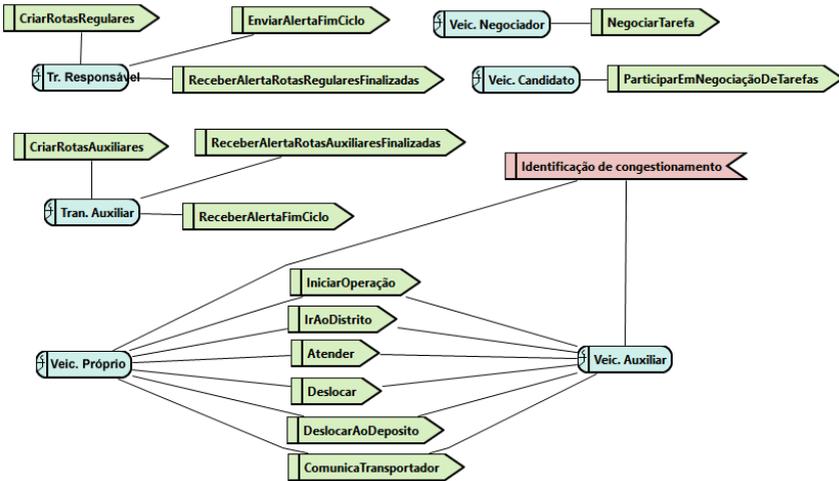
Por fim, na fase de detalhamento de implantação foi realizada a descrição de cada agente isoladamente, dando foco específico ao que cada um destes necessita em termos de desenvolvimento de código. Neste momento é também finalizada a documentação, adicionando-se descritores aos objetos gerados na modelagem.

### 5.3.5 Definição de região de atuação

Para realizar a simulação dos experimentos, foi proposta uma aplicação numa região urbana fictícia, onde o armazém de uma empresa OEM, fica situado fora de uma região urbana, entretanto, esse armazém recebe componentes de seus fornecedores que estão dentro desta região. Por estarem os fornecedores na região urbana, a operação de coleta de componentes sofre o impacto da existência de congestionamentos frequentemente observados nestas regiões.

A fim de equilibrar a carga de trabalho entre vários veículos que

Figura 17 – Diagrama de papéis da metodologia Prometheus.



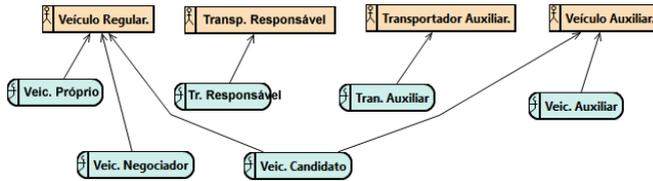
Fonte: Elaborada pelo autor.

atendem a uma região, adotou-se a criação de distritos conforme a configuração *wedge-shape*, ilustrada pela figura 20. Quando se utiliza um depósito central, são gerados distritos alongados na direção do depósito (NEWELL; DAGANZO, 1986; NOVAES et al., 2009). Como observado por Newell e Daganzo (1986), este formato alongado é coerente com a geometria das rodovias de muitas cidades, onde principais rodovias irradiam de um ponto central para as periferias. Para a formação dos distritos são informados ao modelo: os raios das seções e os ângulos entre as fronteiras dos distritos.

As distâncias entre cada visita foram ainda ajustadas por um fator de correção  $k$ , neste trabalho considerou-se que esse fator comportasse segundo uma função de distribuição log-normal. Por sua vez, os tempos de viagem em trânsito normal, os tempos de viagem em trânsito congestionado e os tempos de atendimento em cada visita, também são regidos por funções de distribuição log-normal. Os parâmetros utilizados nestas distribuições de probabilidade são descritos na seção 5.4.5.

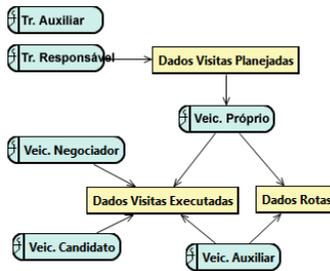
A carga de tarefas em cada distrito é calculada a partir de vários parâmetros, como: distância do distrito ao depósito, probabilidade de congestionamento, velocidade média em trânsito normal e em trânsito

Figura 18 – Diagrama de agrupamento de papéis da metodologia Pro-metheus.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Diagrama de acoplamento de dados da metodologia Pro-metheus.

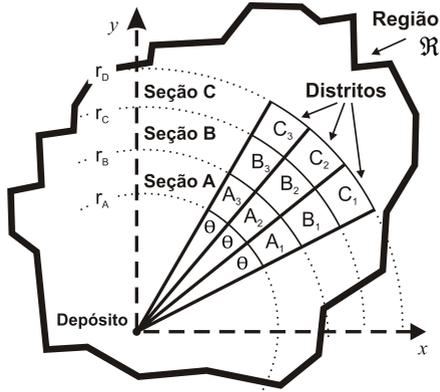


Fonte: Elaborada pelo autor.

congestionado, tempo médio de serviço no cliente, etc. Como se pode observar na figura 21, as rotas planejadas para os veículos próprios variam de acordo com a distância do depósito. Uma vez que as rotas mais distantes da origem precisam deslocar-se mais para chegar aos clientes, estas possuem menos tempo disponível para a realização de tarefas.

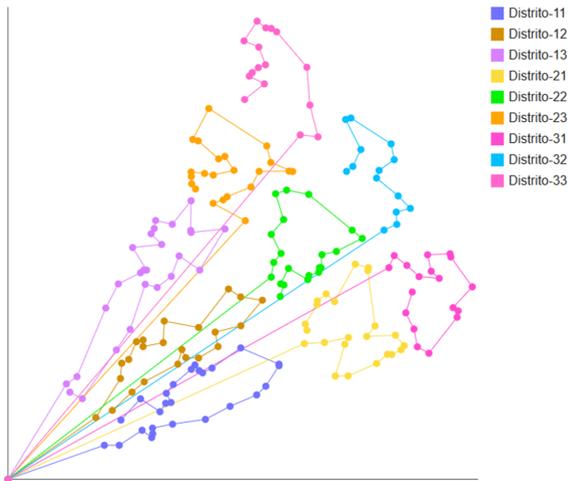
Embora neste modelo todas as rotas criadas sejam fechadas, isto é, no modelo os veículos iniciam e finalizam sua rota no mesmo local. Entretanto, nas figuras que ilustram os roteiros realizados (Figura 21), foi excluída do desenho a última linha de cada rota, que representa o retorno ao depósito. Isto foi feito para se identificar visualmente o início da rota e, eliminar a carga de informação na região próxima à origem plotada.

Figura 20 – Modelagem de distritos pela configuração *wedge-shape*.



Fonte: Novaes et al. (2009).

Figura 21 – Distritos gerados pela configuração *wedge-shape*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

A ferramenta proposta para a realização da roteirização dinâmica de veículos pode ser classificada como uma MABS, onde as percepções dinâmicas que os agentes têm do ambiente são substituídas por variáveis aleatórias que influenciam diretamente nas operações dos veículos. Os resultados obtidos durante os processos de simulação são armazenados em um banco de dados para análises futuras. Com esta ferramenta foi possível avaliar diferentes estratégias de colaboração, através de indicadores de desempenho.

Neste trabalho são abordadas principalmente atividades nos níveis tático e operacional. No nível tático, a ferramenta permitirá a realização de adequações na programação de atividades (*scheduling*), de acordo com o nível de serviço contratado. Por sua vez, no nível operacional, os agentes podem tomar decisões decorrentes de alterações nas condições em que os serviços são prestados. Um exemplo poderia ser a interrupção de uma rodovia, exigindo que todas as rotas que passam por aquele trecho sejam alteradas para caminhos alternativos. Outro exemplo de incidente que pode ser gerenciado pelos agentes consiste na ocorrência de congestionamentos, que prejudicam a velocidade operacional estimada dos veículos. Isto pode fazer com que veículos tenham de transferir parte de suas visitas a outros veículos.

Diferentes processos estocásticos precisam ser implementados para fins de simulação, a fim de capacitar a ferramenta a gerar números aleatórios próximos dos valores que seriam obtidos em um ambiente real de operação. Embora diversos estudos tenham feito uso de MABS, apenas alguns deles detalham os processos estocásticos utilizados, *e.g.* a demanda dos clientes seguindo uma distribuição normal (KWON; IM; LEE, 2008) e a curva da produção modelada por uma função logística (KAIHARA, 2003).

O mapeamento dos processos estocásticos envolvidos pode ser feito também através de séries históricas. Por exemplo, baseando-se na média percentual do tempo gasto com os serviços, pode-se estimar o tempo futuro gasto com serviços (WANG et al., 2008).

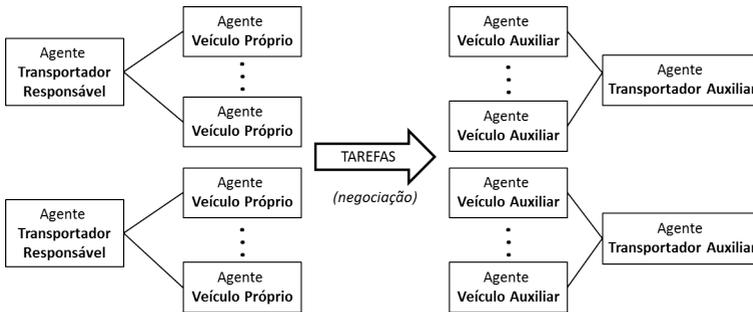
A ferramenta proposta, modelada com base no *framework* Jade, pode atuar como *middleware* para diferentes sistemas existentes nas empresas, integrando-se a estes através de *webservices*. Ela contribui para a redução dos esforços em automatizar os sistemas já em utilização, uma vez que não propõe grandes mudanças naqueles já existentes nas empresas, fato que pode acarretar em resistência à sua adoção. Além disso, o retorno sobre investimento na tecnologia deve compen-

sar os riscos envolvidos à sua implementação, uma vez que a operação integrada em si ainda é um paradigma para muitas empresas.

#### 5.4.1 Estrutura de agentes

Os agentes propostos estão organizados hierarquicamente, como pode ser visto na figura 22. Apresentando o relacionamento entre os agentes: transportador responsável, transportador auxiliar, veículo próprio e veículo auxiliar. No modelo proposto, o agente transportador responsável controla um número fixo de veículos próprios em sua frota. Por outro lado, o transportador auxiliar inicia um número determinado de veículos auxiliares, sendo que o número de veículos auxiliares utilizados em cada experimento é definido no início do experimento. A partir do início da operação, veículos próprios e auxiliares podem negociar transferências de tarefas entre eles a fim de reduzir a quantidade de tarefas não realizadas.

Figura 22 – Estrutura de agentes proposta para roteirização dinâmica de veículos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A operação de um ciclo pelos agentes transportador responsável, transportador auxiliar, veículo próprio e veículo auxiliar é ilustrada na figura 23. A cada ciclo, isto é, a cada dia de operação, o agente transportador responsável dá início a sua operação informando aos veículos próprios e ao transportador auxiliar que um novo ciclo deve ser iniciado. Um ciclo é finalizado quando todos os veículos próprios e auxiliares terminam suas rotas.

Quadro 8 – Estrutura de agentes.

Agente	Representa	Objetivo	Operações
Transportador Responsável	Empresa transportadora responsável pela realização de uma determinada quantidade de coletas em fornecedores	Maximizar o nível de serviço, isto é, o atendimento da maior quantidade de tarefas	Aguardar autorização de sincronização, Pedir autorização de sincronização, Criar rotas regulares, Enviar alerta de fim de ciclo, e Aguardar rotas finalizadas
Transportador Auxiliar	Empresa transportadora auxiliar que auxilia as operações do transportador responsável	Disponibilizar veículos auxiliares para apoiar operações de veículos próprios	Criar rotas auxiliares, Receber alerta de fim de ciclo, e Aguardar rotas finalizadas
Veículo Próprio	Veículo de transportador responsável	Atender as tarefas inicialmente atribuídas	Deslocamento, Atendimento, Ida ao distrito, Iniciar operação, Leiloar tarefa, Participar de leilão de tarefa, Aguardar autorização de sincronização, Pedir autorização de sincronização, Retorno ao depósito, Comunicar transportador, Realizar leilão e Identificar situações de congestionamentos
Veículo auxiliar	Veículo de transportador auxiliar	Atender as tarefas pelas quais se comprometeu através de negociação durante a operação	Somam-se às operações dos veículos próprios e Receber alerta de fim de ciclo

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.4.2 Banco de dados

Para gerenciar os dados produzidos pelo modelo durante a simulação foi utilizado o sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) PostgreSQL, de uso livre e robusto o suficiente para armazenar grandes volumes de dados.

Como pode ser observado na figura 24, as informações geradas em cada experimento de simulação estão armazenadas nas seguintes tabelas:

- Simulação: informações gerais do experimento simulado, como código da simulação, número de ciclos simulados, tipo da simulação, número de veículos próprios envolvidos, número de veículos auxiliares envolvidos, distância média viajada por veículos próprios, distância média viajada por veículos auxiliares, tempo médio de ciclo de veículos próprios, número médio de visitas estimadas para veículos próprios, número médio de visitas realizadas pelos veículos próprios, número médio de visitas realizadas pelos veículos auxiliares, percentual médio de visitas não atendidas, e tempo de ciclo médio de veículos auxiliares;
- Rotas: informações das rotas realizadas em cada simulação, quais sejam código da simulação, código do ciclo, código da seção, código do distrito, distância viajada, tempo de ciclo, total de visitas planejadas e total de visitas executadas;
- Visitas planejadas: informações das visitas inicialmente atribuídas às rotas, como código da simulação, código do ciclo, código da seção, código do distrito, coordenada do eixo X, coordenada do eixo Y, e ordem do ponto na rota;
- Visitas: informações das visitas executadas em cada rota, tais quais código da simulação, código do ciclo, código da seção, código do distrito, coordenada do eixo X, coordenada do eixo Y, tempo de início de atendimento, tempo de fim de atendimento, tempo de deslocamento até o próximo ponto e ordem do ponto na rota;
- Eventos: informações de eventos identificados em cada rota, relacionadas à identificação de congestionamentos, exclusão de tarefa e inserção de tarefa; contendo código da simulação, código do ciclo, código da seção, código do distrito, coordenada do eixo X, coordenada do eixo Y, tipo de evento, e instante em que ocorreu;

Para que o banco de dados tivesse um bom tempo de resposta, foram criados índices para as tabelas com maiores volumes de dados. Estes índices aumentam o espaço de armazenamento necessário e tornam um pouco mais lentas as operações de inserção e atualização, contudo melhoram a velocidade das operações de leitura dos dados. Os índices criados para esta ferramenta foram:

```

CREATE INDEX chaveRotas
ON rotas
USING btree
(cods DESC, codc, zonai, zonaj);

CREATE INDEX "chaveVisitasPlanejadas"
ON visitasplanejadas
USING btree
(cods DESC, codc, zonai, zonaj, ordemnarota);

CREATE INDEX "chaveVisitas"
ON visitas
USING btree
(cods DESC, codc, zonai, zonaj, ptx);

CREATE INDEX "eventosIndex"
ON eventos
USING btree
(cods DESC, codc, zonai, zonaj, ptx);

```

Com relação ao gerenciamento das conexões, utilizou-se o padrão de projeto *factory* para a criação de um *pool* de 20 (vinte) conexões. O uso de um *pool* de conexões estabelece que todas as conexões com o banco de dados sejam abertas no início das operações e que apenas sejam fechadas ao fim da simulação. O reuso das conexões já abertas elimina da simulação a necessidade de abrir e fechar conexões em cada acesso ao banco de dados.

### 5.4.3 Implementação do MAS

Diferentemente dos processos de simulação convencionais, a simulação baseada em agentes está no campo da computação distribuída, podendo ser realizada em diferentes computadores. Entretanto, neste estudo os agentes associados a cada experimento foram executados em um mesmo computador, abstraindo as questões relativas à computação

distribuída, que não são relevantes a este trabalho, como: diversidade de *hardwares* envolvidos, latência de rede, excessivo volume de mensagens na rede, segurança das informações que estão sendo trafegadas, dentre outras.

Para o desenvolvimento do MAS, buscou-se por uma plataforma que permitisse não apenas a simulação, mas que fosse extensível através de *webservices* para aplicações mais próximas de sistemas corporativos. Isso motivou a escolha do *framework* de agentes Jade, que possui licença livre *Lesser General Public License Version 2* (LGPL), para a implementação do MAS.

Foram utilizados três equipamentos para a realização dos experimentos: um notebook intel core i7 de 2,67GHz, com 6GB de RAM e sistema operacional (SO) Windows 8; um computador *desktop* intel core i5 de 2,67GHz, com 4GB de RAM e SO Windows 7; e um computador *desktop* intel pentium dual-core 2,5GHz, com 4GB e SO Windows 7. Todos os equipamentos utilizados continham ainda a versão do Java Development Kit (JDK) 1.7.0 para desenvolvimento de sistemas Java.

Dentre as bibliotecas utilizadas para o desenvolvimento, pode-se destacar:

- JDBC 4 (para postgresql-9.2 versão 1002), para o acesso ao banco de dados;
- Commons DBCP (versão 1.4) e Commons Pool (versão 1.6) para o gerenciamento das conexões com o banco de dados, criando um *pool* de conexões para reduzir o tempo de criação das conexões com o banco de dados;
- Commons Lang (versão 2.6) para a manipulação de classes presentes no Java;
- Commons Math (versão 3.2) para a disponibilização de diferentes métodos matemáticos;
- Java EEE API (versão 7.0) e Java Mail (versão 1.4.7) para o envio automático de e-mail ao fim de um experimento de simulação;
- SLF4j API (versão 1.7.5) para o gerenciamento do *logging* da aplicação.

Uma vez que uma estratégia de colaboração foi simulada e validada na ferramenta, esta não necessita ser completamente reescrita para ser utilizada nas operações empresariais. A simulação permite

que diferentes estratégias de colaboração sejam avaliadas, a fim de simular eventos reais (como deslocamento de um veículo, atendimento de um cliente, congestionamento de uma via, etc.). Para isto, utilizam-se diferentes geradores de números randômicos, enquanto que nas aplicações reais essas informações podem ser obtidas diretamente dos sistemas de informações das empresas. Desta maneira, o uso da ferramenta proposta pode reduzir o tempo de desenvolvimento de novas soluções práticas baseadas em agentes para o transporte de cargas.

#### 5.4.4 Sistema de gerenciamento dos resultados

Com o objetivo de gerenciar os resultados dos experimentos e fazer uma verificação visual dos acontecimentos existentes durante a realização do roteiro e, conseqüentemente, do comportamento dinâmico da simulação, desenvolveu-se um sistema *web* para apresentação dos dados gerados pelo modelo. Para isso, foi utilizado o *framework* Grails que, por obedecer a vários padrões de projeto de sistemas — como o *Model View Controller* (MVC) — permitiu o desenvolvimento ágil e organizado da ferramenta de gerenciamento dos resultados.

As principais funcionalidades adicionadas à ferramenta foram o gerenciamento de: simulações (Figura 25), rotas (Figura 26), e visitas realizadas (Figura 27). A seguir, uma descrição mais detalhada de cada tela.

A figura 25 ilustra a tela de gerenciamento de simulações. Nesta tela são visualizados dados gerais de cada simulação, como: quantidade de ciclos simulados (onde um ciclo representa um dia de operação), tipo de simulação (que identifica a estratégia simulada), distância viajada dos veículos auxiliares, distância viajada dos veículos próprios, número de veículos auxiliares e número de veículos regulares, dentre outros dados.

Por sua vez, a figura 26 ilustra a tela de gerenciamento das rotas, onde cada rota está associada a uma determinado ciclo de uma simulação. Nesta tela são visualizados os seguintes dados de cada rota: código da simulação, código de ciclo, código da seção, código do distrito, total de visitas planejadas, total de visitas realizadas, distância viajada, tempo de ciclo, dentre outros dados.

Figura 26 – Tela de gerenciamento de rotas.

Principal		Novo Rotas					
Rotas Listagem							
Cods	Codc	Zonai	Zonaj	Totvisitasplanejadas	Totvisitasexecutadas	Distviajada	Tempociclofor
<a href="#">1.605</a>	998	0	2	25	25	62,006	429,374
<a href="#">1.605</a>	999	2	2	14	14	97,65	386,784
<a href="#">1.605</a>	999	2	1	15	15	97,022	388,65
<a href="#">1.605</a>	999	2	0	17	17	100,979	405,826
<a href="#">1.605</a>	999	1	0	21	21	87,639	416,522
<a href="#">1.605</a>	999	0	1	23	23	59,963	382,898

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 27, tela de visitas realizadas, são apresentados os dados de cada visita de uma rota. Sendo as principais informações: código da simulação, código de ciclo, código da seção, código do distrito, coordenada X, coordenada Y. Outros dados importantes, mas que não estão presentes nesta tela são o tempo de deslocamento para chegar ao cliente da visita e o tempo de atendimento da visita.

Figura 27 – Tela de gerenciamento de visitas realizadas.

Principal		Novo Visitas			
Visitas Listagem					
Cods	Codc	Zonai	Zonaj	Ptx	Pty
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	23,534	7,385
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	21,648	6,327
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	21,114	7,994
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	19,933	5,568
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	20,476	10,936
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	20,561	8,888
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	22,149	6,025
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	23,54	7,452
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	19,894	7,772
<a href="#">1.040</a>	243	1	0	21,827	8,065

Anterior 1 ... 9435 9436 9437 9438 9439 **9440** 9441 9442 9443 9444 ... 943935 Próximo

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além das telas de gerenciamento dos dados da simulação, uma

tela de geração customizável de gráficos permite que um usuário selecione uma série de opções para apresentar o resultado das simulações de diferentes maneiras, como pode ser visto na figura 28. Os filtros utilizados neste relatório são os seguintes: código de simulação, código de ciclo, rotas e horizonte de tempo.

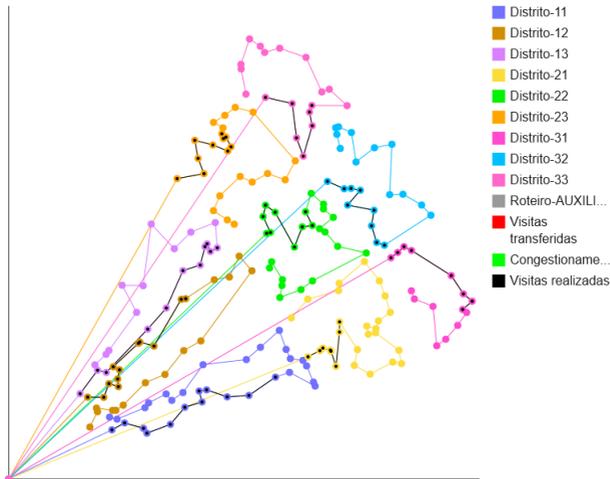
Figura 28 – Opções de customização dos gráficos obtidos com a ferramenta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a apresentação dos gráficos também foi utilizada a *Application Programming Interface* (API) do Google Charts. Apesar de esta API facilitar a geração de diferentes tipos de gráficos, neste trabalho foi utilizado apenas o gráfico do tipo Scatter Chart. Como pode ser observado na figura 29, este gráfico exibe os pontos visitados em cada roteiro em relação aos eixos X e Y, conforme o modelo utilizado para geração dos pontos foi descrito na seção 5.3.5. De acordo com as opções escolhidas, podem-se observar neste gráfico as visitas planejadas para uma rota, as visitas realizadas até um determinado instante de tempo, as visitas que foram transferidas de um determinado roteiro, a percepção de congestionamento pelos veículos, etc.

Figura 29 – Exemplo de gráfico obtido na ferramenta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 5.4.5 Parâmetros utilizados

Os parâmetros utilizados nas simulações realizadas foram obtidos, em sua maioria, do trabalho de Burin (2011), que realizou simulações em um mesmo caso de coleta de produtos em ambiente OEM, cuja localização dos envolvidos também foi modelada com a configuração *wedge-shape*. Além desses, outros parâmetros foram identificados devido ao uso da modelagem baseada em agentes. Os parâmetros, apresentados a seguir, foram organizados nas seguintes categorias: região de atuação, transportadora, e veículos.

Os parâmetros relacionados com a região de atuação são:

- Número de seções em que a área de análise foi dividida: 3;
- Número de distritos em que cada seção foi dividida: 3;
- Densidade de pontos em toda a região: 0,75;
- Quantidade equilibrada de clientes em um distrito em cada seção: {36, 29, 25};
- Quantidade sobrecarregada de clientes em um distrito em cada seção: {47, 34, 29};

- Distância do depósito à primeira seção (raio inicial): 6;
- Ângulos utilizados para determinar a área dos distritos:  $\{15, 30, 45, 60\}$ ;
- Probabilidade de o trânsito estar em condições normais (não congestionado): 0,6;
- Média de ajuste da distância: 1,32;
- Desvio padrão de ajuste da distância: 0,0915.

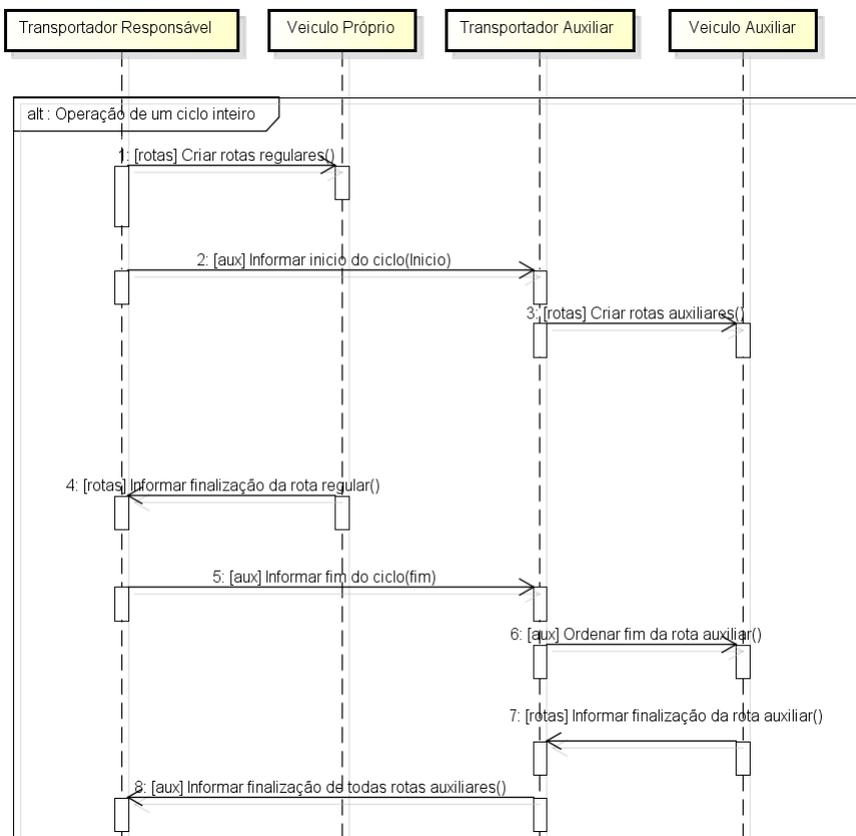
Por sua vez, os parâmetros relacionados com a transportadora responsável pela operação são:

- Probabilidade de um cliente solicitar serviço: 0,7;
- Jornada de trabalho de cada veículo: 8 horas diárias (ou 480 minutos);
- Média do tempo de serviço em cada cliente: 12;
- Variação do tempo de serviço em cada cliente: 6;
- Localização do depósito:  $(0, 0)$ ;

Finalmente, aqueles relacionados com os veículos são:

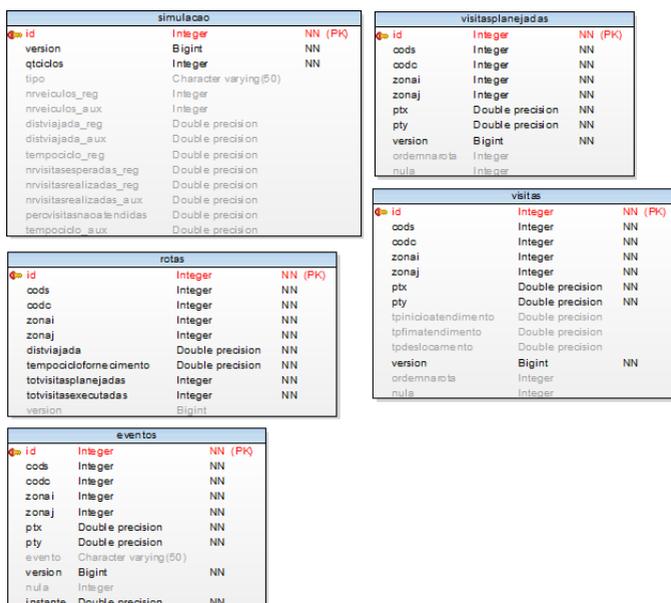
- Média de velocidade em trânsito normal: 30;
- Variação de velocidade em trânsito normal: 7.5;
- Média de velocidade em trânsito lento: 20;
- Variação de velocidade em trânsito lento: 5;
- Parâmetro para análise sequencial, probabilidade inicial: 0;
- Parâmetro para análise sequencial, probabilidade final: 0,7;
- Parâmetro para análise sequencial, alfa: 0,005;
- Parâmetro para análise sequencial, beta: 0,005;
- Localização inicial e final dos veículos próprios e auxiliares:  $(0, 0)$ .

Figura 23 – Operação de um ciclo de simulação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Modelagem do banco de dados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Tela de gerenciamento de simulações.

Principal	Novo Simulacao												
<b>Simulacao Listagem</b>													
Qtcciclos	Tipo	Distviajadaaux	Distviajadareg	Nrveiculosaux	Nrveiculosreg								
1.000	estatica	0	737,584	0	9								
50	dinamica_agentes_ult_aux_7	1.345,026	724,735	7	9								
1.000	dinamica_centroMassa	45,304	732,409	1	9								
2.000	dinamica_agentes_equil	0	729,333	0	9								
1.000	dinamica_agentes_equil	0	729,207	0	9								
Anterior		1	..	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.5 SIMULAÇÃO

Os experimentos simulados avaliam a utilização de estratégias baseadas em agentes para solucionar o problema da coleta no contexto de empresas OEM onde, a cada dia de operação, o agente transportador responsável envia aos agentes veículos próprios informações sobre quais os clientes que deverão ser atendidos no respectivo dia. Nos experimentos que fazem uso de veículos auxiliares, o agente transportador responsável se comunica com um agente transportador auxiliar para que sejam enviados no início da operação veículos auxiliares a locais determinados da região de atuação.

A modelagem desta região foi discutida na seção 5.3.5 e os parâmetros utilizados na simulação foram listados na seção 5.4.5, onde consoma-se uma região com nove distritos (ou seja, com nove rotas regulares). Para auxiliar as rotas regulares foram propostos veículos auxiliares, estes foram adicionados de acordo com uma política descrita na seção 5.3.2.1, onde foram testados até sete veículos auxiliares. Os indicadores utilizados apontaram que ao utilizar sete veículos auxiliares os resultados já não são interessantes, assim, não foi necessário testar cenários com mais veículos.

Cada ciclo operacional corresponde a um dia de operação. O controle é realizado pelo agente transportador responsável, que avisa aos outros agentes quando o ciclo inicia e termina. Neste trabalho, cada experimento simulado contempla 1000 ciclos. Com este número de experimentos pode-se verificar a convergência da simulação, cujos resultados foram discutidos na seção 5.6.

Diferentes estratégias de colaboração entre os agentes foram utilizadas, propondo a escolha das tarefas a serem removidas do roteiro regular, o cálculo das propostas para as negociações, o método de avaliação e seleção das propostas recebidas. Além destas características, foi ainda analisado dentro de cada estratégia o uso ou não dos veículos auxiliares. Sendo assim, os doze experimentos realizados são definidos na tabela 9, pelas seguintes características: identificador do experimento, tipo do experimento, quantidade de veículos próprios (VP) utilizados, quantidade de veículos auxiliares (VA) utilizados e tipo de negociação utilizada.

Quadro 9 – Número de simulações executadas.

Id	Tipo	VP*	VA**	Tipo de negociação
1	Estático	9	0	NA
2	Dinâmico	9	1	NA (transferência imposta pelo centro de massa)
3	Dinâmico	9	0	Colaboração para equilibrar a distância total de cada veículo
4	Dinâmico	9	0	Colaboração para reduzir o acréscimo na distância total percorrida
5	Dinâmico	9	0	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
6	Dinâmico	9	1	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
7	Dinâmico	9	2	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
8	Dinâmico	9	3	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
9	Dinâmico	9	4	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
10	Dinâmico	9	5	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
11	Dinâmico	9	6	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos
12	Dinâmico	9	7	Colaboração para equilibrar a distância a percorrer dos veículos

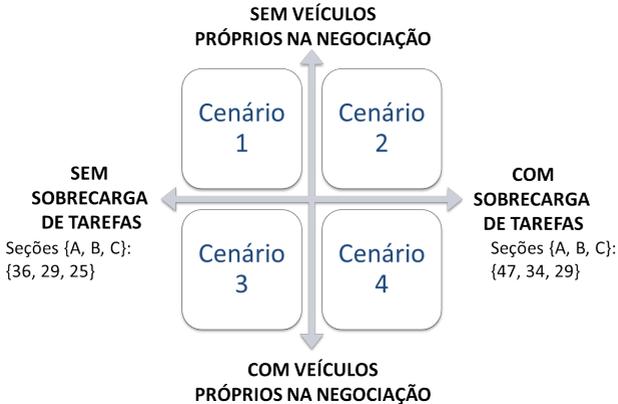
Fonte: Elaborada pelo autor.

\* quantidade de veículos próprios; \*\* quantidade de veículos auxiliares

Cada um destes experimentos foi avaliado em diferentes cenários. Estes cenários se caracterizam pelo nível de carga dos veículos próprios (sendo avaliados cenários com carga equilibrada e com carga excessiva) e pela participação ou não dos veículos próprios no processo de negociação (em geral veículos próprios apenas negociam suas tarefas, mas estes podem participar de negociações de tarefas de outros veículos próprios). Deste modo, como ilustrado na figura 30, foram analisados 4 (quatro) cenários: o primeiro, sem sobrecarga inicial de tarefas e sem participação de veículos próprios na negociação em experimentos dinâmicos; o segundo, com sobrecarga inicial de tarefas e sem participação de veículos próprios na negociação em experimentos dinâ-

micos; o terceiro, sem sobrecarga inicial de tarefas e com participação de veículos próprios na negociação em experimentos dinâmicos; e por fim, o cenário com sobrecarga inicial de tarefas e com participação de veículos próprios na negociação em experimentos dinâmicos.

Figura 30 – Cenários simulados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Esta seção apresenta a análise dos resultados obtidos e discussões realizadas a partir da realização de todos os 12 (doze) experimentos realizados em cada um dos 4 (quatro) cenários explicados na seção 5.5. A tabela 1 apresenta uma síntese das simulações realizadas. Vale destacar que todos os experimentos em questão foram simulados 1000 vezes.

Para fins de avaliação dos resultados em relação ao indicador custo total, foram estabelecidos hipoteticamente alguns custos operacionais de acordo com a tabela 2. A escolha de valores hipotéticos não prejudica as análises realizadas neste trabalho, uma vez que esta é uma aplicação teórica. Assim, bastou-se escolher valores razoáveis que permitissem o uso do método.

Para aplicações práticas, tais valores devem ser obtidos diretamente com as empresas envolvidas. Considerou-se neste trabalho o custo fixo de um veículo próprio igual ao custo de um veículo auxi-

Tabela 1 – Número de simulações executadas.

Rotas regulares	
Cenários avaliados	4
Experimentos	X 12
Rotas regulares por experimento	X 9
Ciclos simulados	X 1000
Subtotal de simulações 1	= 432.000
Rotas auxiliares	
Cenários avaliados	4
Rotas auxiliares nos experimentos	X 29
Ciclos simulados	X 1000
Subtotal de simulações 2	= 116.000
Total de simulações	= 548.000

Fonte: Elaborada pelo autor.

liar adicional. A quilometragem viajada é obtida a partir dos valores observados nos veículos regulares e auxiliares. Por fim, o custo extra representa uma penalidade cobrada por cada tarefa não realizada, estas podem ser obtidas pela subtração do número total de tarefas planejadas para os veículos próprios do número total de tarefas executadas por veículos próprios e auxiliares.

Tabela 2 – Definição de parâmetros para análise financeira dos experimentos.

Parâmetro financeiro	Valor	Unidade
Custo fixo de um veículo por dia	208	BRL
Custo variável de quilometragem viajada	1,12	BRL
Custo extra por tarefa não realizada	100	BRL

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.6.1 Cenário 1 — Sem sobrecarga de tarefas e Sem participação de veículos próprios na negociação

Neste cenário as tarefas são atribuídas inicialmente aos veículos próprios de maneira equilibrada fazendo com que, mesmo no cenário es-

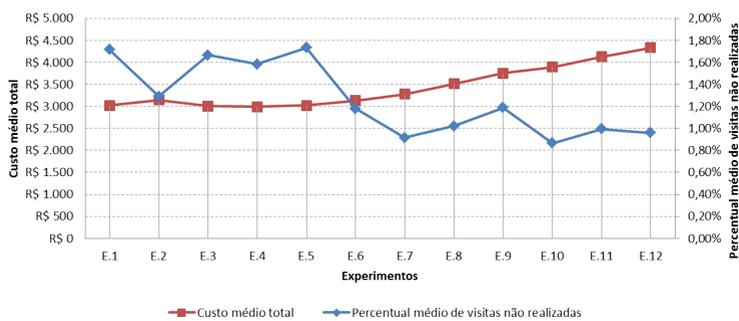
tático, o percentual de visitas não realizadas fosse pequeno. Os resultados deste cenário são apresentados na tabela 3, onde cada experimento é detalhado em função das seguintes informações: código da simulação, número de ciclos, quantidade de veículos próprios e auxiliares, distância viajada pelos veículos próprios e auxiliares, tempo de ciclo dos veículos próprios e auxiliares, número de visitas realizadas por veículos próprios e auxiliares, e percentual de visitas não realizadas. Os valores presentes nesta tabela são valores médios obtidos a partir de medições observadas em cada ciclo de simulação.

Observa-se que a inclusão de um veículo auxiliar, como no caso do experimento 2, apesar de melhorar o percentual de visitas não atendidas, resulta num custo total diário maior que no experimento estático (experimento 1). Isto se dá porque o percentual de visitas realizadas pelo veículo auxiliar não é grande o suficiente para fazer com que o custo extra pela não realização das tarefas ultrapasse o custo fixo associado à inclusão de um novo veículo. A figura 31 ajuda a visualizar como os custos fixos associados ao uso de veículos auxiliares tornam o custo total diário desses experimentos ainda maior; isto aconteceu em todos os experimentos com veículos auxiliares neste cenário. Contudo, nestes casos a inclusão de veículos auxiliares proporciona uma melhoria no nível de serviço até o experimento 7, quando a inclusão de veículos auxiliares não produz maiores melhorias do nível de serviço.

Mesmo não produzindo melhorias, a inclusão de veículos auxiliares, a partir do experimento 7, apresenta um comportamento indesejado que é o aumento do percentual de visitas não realizadas. Este comportamento é indesejado porque ao incluir novos veículos, na pior das hipóteses, deveria-se manter o percentual estável. Entretanto, como o posicionamento dos veículos auxiliares muda de acordo com a quantidade de veículos utilizada, é de se esperar que variações desse percentual pudessem ocorrer, ainda mais quando o percentual de visitas não realizadas é muito baixo.

Como não foram consideradas as negociações entre veículos, os experimentos 3, 4 e 5 têm resultados praticamente idênticos ao estático, onde cada veículo realiza sua rota individualmente.

Figura 31 – Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Resultados do cenário 1.

EXPERIMENTOS	EXP. 1	EXP. 2	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8	EXP. 9	EXP. 10	EXP. 11	EXP. 12
Código	1601	1603	10078	10089	10091	10092	10093	10094	10095	10096	10097	10098
Nr. de Ciclos	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Nr. Veículos Regulares	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nr. Veículos Auxiliares	0	1	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
Dist. Viagem Regulares	737,58	732,41	732,33	733,17	733,37	735,68	727,10	731,09	737,33	726,35	731,41	731,29
Dist. Viagem Auxiliares	0,00	45,30	0,00	0,00	0,00	175,41	372,28	565,59	765,28	960,22	1154,24	1354,50
Tempo Ciclo Regulares	3774,79	3745,17	3761,91	3760,82	3762,95	3744,68	3728,99	3738,88	3747,07	3724,50	3738,82	3735,99
Tempo Ciclo Auxiliares	0,00	389,07	0,00	0,00	0,00	479,84	989,42	1481,64	1997,01	2495,78	2996,43	3501,30
Nr. Vistas Esp. Regulares	189,13	189,54	188,96	188,83	189,27	188,68	188,95	189,09	188,88	188,53	188,97	188,95
Nr. Vistas Real. Regulares	185,89	184,46	185,81	185,85	185,99	183,99	184,61	184,15	183,70	184,03	184,04	184,21
Nr. Vistas Real. Auxiliares	0,00	2,64	0,00	0,00	0,00	2,47	2,62	3,01	2,94	2,87	3,05	2,92
Visitas Não Realizadas (%)	1,715%	1,290%	1,665%	1,582%	1,733%	1,177%	0,915%	1,021%	1,187%	0,865%	0,994%	0,960%
Custo Total Diário (R\$)	3.022,39	3.144,80	3.006,91	2.991,95	3.021,37	3.126,06	3.275,15	3.507,93	3.754,01	3.888,61	4.127,08	4.328,45

Fonte: Elaborada pelo autor.

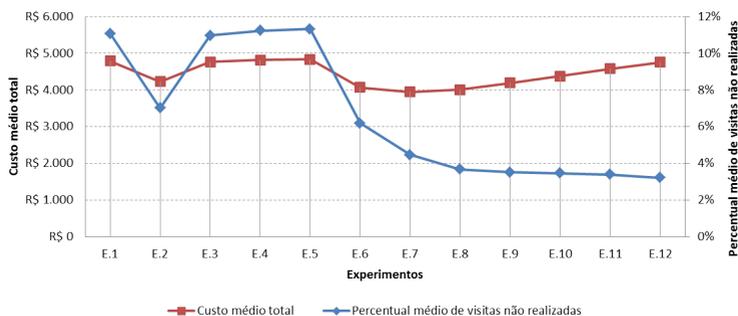
### 5.6.2 Cenário 2 — Com sobrecarga de tarefas e Sem participação de veículos próprios na negociação

Nesta situação observa-se que o número elevado de tarefas não realizadas faz com que o custo total do cenário estático aumente, como pode ser observado na tabela 4 e na figura 32. Nesta situação, a inclusão de um veículo auxiliar leva à redução do percentual de tarefas não realizadas, e a multa cobrada pela não realização destas tarefas torna o custo total do experimento 2 menor do que o experimento 1, mesmo tendo este um custo fixo menor por possuir um veículo a menos.

Podem ser percebidos nos experimentos deste cenário que o elevado número de tarefas não realizadas aumenta consideravelmente o custo total do cenário estático (ver figura 32).

Como no cenário 1, pode ser verificado que os experimentos 3, 4 e 5 têm resultados próximos ao estático. A inclusão de veículos auxiliares permite lidar com o excesso de carga dos veículos próprios, levando também a uma gradual redução no percentual de tarefas não atendidas. Todavia, observa-se que a partir do experimento 7 o custo total volta a crescer, sinalizando que o custo fixo adicional pela inclusão de veículos auxiliares não justifica as melhorias obtidas. Assim, considerando-se o custo médio total como critério de escolha do melhor experimento, a inclusão de 2 veículos auxiliares, no experimento 7, mostrou-se a opção mais interessante.

Figura 32 – Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Resultados do cenário 2.

EXPERIMENTOS	EXP. 1	EXP. 2	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8	EXP. 9	EXP. 10	EXP. 11	EXP. 12
Código	1601	1603	10078	10089	10091	10092	10093	10094	10095	10096	10097	10098
Nr. de Ciclos	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Nr. Veículos Regulares	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nr. Veículos Auxiliares	0	1	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
Dist. Viajada Regulares	737,58	732,41	732,33	733,17	733,37	735,68	727,10	731,09	737,33	726,35	731,41	731,29
Dist. Viajada Auxiliares	0,00	45,30	0,00	0,00	0,00	175,41	372,28	565,59	765,28	960,22	1154,24	1354,50
Tempo Ciclo Regulares	3774,79	3745,17	3761,91	3760,82	3762,95	3744,68	3728,99	3738,88	3747,07	3724,50	3738,82	3735,99
Tempo Ciclo Auxiliares	0,00	389,07	0,00	0,00	0,00	479,84	989,42	1481,64	1997,01	2495,78	2996,43	3501,30
Nr. Visitas Esp. Regulares	189,13	189,54	188,96	188,83	189,27	188,68	188,95	189,09	188,88	188,53	188,97	188,95
Nr. Visitas Real. Regulares	185,89	184,46	185,81	185,85	185,99	183,99	184,61	184,15	183,70	184,03	184,04	184,21
Nr. Visitas Real. Auxiliares	0,00	2,64	0,00	0,00	0,00	2,47	2,62	3,01	2,94	2,87	3,05	2,92
Visitas Não Realizadas (%)	11,087%	7,011%	10,968%	11,239%	11,319%	6,182%	4,460%	3,678%	3,512%	3,463%	3,387%	3,212%
Custo Total Diário (R\$)	4.794,97	4.229,17	4.764,67	4.815,50	4.835,64	4.070,37	3.945,17	4.010,24	4.193,08	4.378,35	4.579,18	4.753,91

Fonte: Elaborada pelo autor.

### **5.6.3 Cenário 3 — Sem sobrecarga de tarefas e Com participação de veículos próprios na negociação**

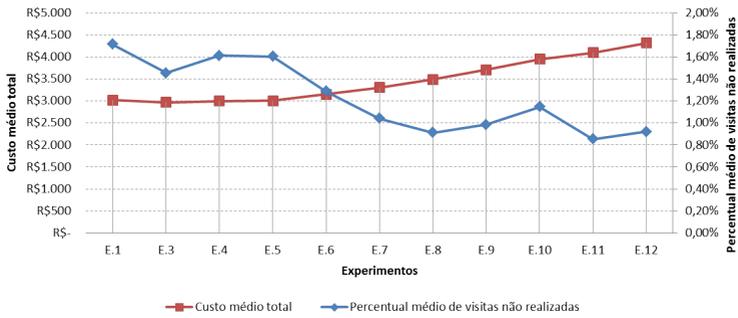
Os resultados deste cenário estão apresentados na tabela 5. Sendo que a remoção do experimento 2 deste cenário mostrou-se necessária, visto que este experimento não utiliza negociação entre os veículos próprios; logo, não permite que estes possam trocar tarefas entre si.

Com base nos resultados obtidos, mostrados na figura 33, percebe-se que a simples negociação entre os veículos próprios não produz melhoria significativa no nível de serviço. Pode-se verificar que, em casos onde as tarefas estão distribuídas adequadamente é mais trabalhoso produzir uma melhoria em um nível de serviço já baixo. Verifica-se que, em casos onde as tarefas estão distribuídas adequadamente, é mais trabalhoso produzir uma melhoria em um nível de serviço já baixo. Tendo isto em vista, o nível de serviço pode ser melhorado com a inclusão de veículos auxiliares; entretanto, tal aumento de frota faz com que o custo médio total cresça mais rápido que a redução do custo extra com tarefas não realizadas. Assim, de modo semelhante ao cenário 1, a inclusão de veículos auxiliares não parece interessante ao se observar o indicador de custo médio total.

Também de modo análogo ao cenário 1, percebe-se que, a partir do experimento 8, ao incluir veículos auxiliares, pode-se acabar aumento do percentual de visitas não realizadas. Como discutido anteriormente, isto deve-se ao fato da mudança de posicionamento dos veículos associado aos baixos percentuais de tarefas não atendidas.

Pode-se ainda observar que o experimento com melhor resultado final é o de número 3, onde sugere-se que os veículos negociem de maneira a equilibrar sua carga de trabalho.

Figura 33 – Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Resultados do cenário 3.

EXPERIMENTOS	EXP. 1	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8	EXP. 9	EXP. 10	EXP. 11	EXP. 12
Código	1601	1600	9097	9098	9099	9100	9101	9102	9103	9105	9106
Nr. de Ciclos	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Nr. Veículos Regulares	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nr. Veículos Auxiliares	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
Dist. Viagem Regulares	737,58	733,94	733,37	742,37	739,96	733,21	732,37	732,16	735,99	727,23	727,31
Dist. Viagem Auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	177,66	374,99	570,58	760,83	954,64	1147,03	1344,68
Tempo Ciclo Regulares	3774,79	3780,86	3777,00	3789,12	3763,10	3749,72	3739,67	3742,19	3751,88	3731,11	3731,41
Tempo Ciclo Auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	481,67	992,91	1484,07	1984,68	2484,06	2980,13	3483,01
Nr. Visitas Esp. Regulares	189,13	189,14	189,20	188,86	189,12	189,35	188,63	189,07	189,00	189,01	189,01
Nr. Visitas Real. Regulares	185,89	186,39	186,15	185,83	184,60	184,77	184,39	184,34	183,98	184,48	184,35
Nr. Visitas Real. Auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	2,09	2,62	2,52	2,87	2,86	2,92	2,91
Visitas Não Realizadas (%)	1,715%	1,454%	1,611%	1,604%	1,287%	1,040%	0,912%	0,994%	1,146%	0,854%	0,921%
Custo Total Diário (R\$)	3.022,39	2.969,11	2.998,18	3.006,46	3.152,15	3.306,10	3.488,25	3.710,02	3.952,81	4.095,90	4.316,69

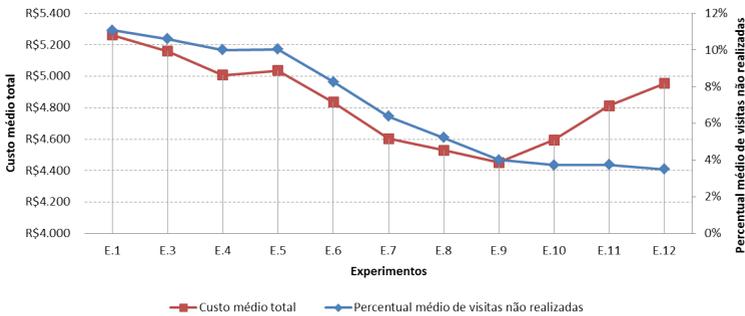
Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 5.6.4 Cenário 4 — Com sobrecarga de tarefas e Com participação de veículos próprios na negociação

Ao observar este cenário, de acordo com os resultados mostrados na tabela 6, observou-se que o experimento 9, com 4 veículos auxiliares, apresentou o melhor custo total. A partir do experimento 10, com 5 veículos auxiliares, as trocas não produzem uma redução significativa no percentual de visitas não atendidas, enquanto que o custo total cresce a cada veículo auxiliar inserido no modelo, comportamento pode ser visualizado na figura 34.

Aqui, observa-se que a negociação entre veículos próprios produz uma leve melhoria no custo médio total, mesmo sem a utilização de veículos auxiliares; entretanto, como discutido anteriormente, os melhores resultados foram alcançados somente com a utilização de veículos auxiliares.

Figura 34 – Comparação entre custo médio total e percentual médio de visitas não atendidas para o cenário 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Resultados do cenário 4.

EXPERIMENTOS	EXP. 1	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8	EXP. 9	EXP. 10	EXP. 11	EXP. 12
Código	1347	9073	9074	9107	9076	9077	9079	9080	9081	9082	9083
Nr. de Ciclos	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Nr. Veiculos Regulares	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Nr. Veiculos Auxiliares	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
Dist. Viagem Regulares	746,90	744,40	739,66	752,36	755,46	747,31	739,22	732,78	731,66	734,84	729,50
Dist. Viagem Auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	153,87	325,69	511,39	690,68	874,08	1071,60	1261,64
Tempo Ciclo Regulares	3999,18	4034,72	4030,40	4052,29	4015,58	4007,60	3994,69	3981,79	3976,93	3976,79	3968,66
Tempo Ciclo Auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	480,12	965,50	1452,44	1946,04	2433,25	2944,57	3437,07
Nr. Visitas Esp. Regulares	230,32	231,49	230,61	231,06	231,05	231,27	230,81	230,49	230,92	231,48	231,19
Nr. Visitas Real. Regulares	205,32	206,95	207,54	207,84	204,41	205,07	205,64	205,77	205,83	205,35	205,25
Nr. Visitas Real. Auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	7,55	11,43	13,11	15,46	16,46	17,44	17,85
Visitas Não Realizadas (%)	11,087%	10,602%	10,004%	10,050%	8,265%	6,388%	5,224%	4,020%	3,736%	3,755%	3,499%
Custo Total Diário (R\$)	5.282,11	5.159,93	5.007,41	5.036,74	4.895,71	4.602,39	4.529,63	4.451,21	4.594,25	4.812,33	4.953,95

Fonte: Elaborada pelo autor.



## 6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é realizada uma análise e discussão acerca dos resultados, destacando as principais descobertas alcançadas ao final de cada etapa do procedimento metodológico, sendo estas: modelagem do problema, implementação do modelo, definição dos experimentos e cenários simulados, e resultados do modelo. Ao final, de uma maneira integrada, é discutido como os resultados de cada etapa contribuem para alcançar o objetivo geral deste trabalho, que é a proposição de um método de avaliação de estratégias de colaboração em sistemas multiagentes na roteirização dinâmica de veículos, levando em consideração indicadores de custo e nível de serviço.

### 6.1 MODELAGEM DO PROBLEMA

Para a proposição do método de avaliação das estratégias de colaboração em empresas OEM, foi necessário o desenvolvimento de um modelo que viabilizasse a implementação de tais estratégias. Este modelo, baseado em agentes, sugere que as empresas possam delegar parte de suas operações a agentes autônomos. Esses podem lidar com questões operacionais de maneira mais ágil, percebendo mudanças no ambiente operacional e reagindo a este sempre que necessário. Deste modo, este sistema contribui para que empresas possam gerenciar as informações de seus pedidos de modo ágil e preciso; e, como discutido por Hugos (2003), isto é fundamental para empresas atuarem em cadeias de suprimentos mais complexas.

Dentre os fluxos logísticos discutidos na seção 2.1, este trabalho concentra-se nos fluxos de informação e de negócio, propondo uma gestão autônoma desses fluxos. O modelo baseado em agentes permite que empresas possam avaliar estratégias de colaboração de maneira autônoma. Assim, deixa de ser necessário que a empresa dedique pessoal e tempo para lidar com questões mais operacionais, podendo dedicar-se a questões mais estratégicas.

Quanto aos processos modelados, desenvolveu-se processos de fornecimento em um contexto de uma empresa OEM. Como discutido na seção 2.2, o modelo SCOR apresenta uma descrição detalhada de processos para cadeias de suprimentos. Entretanto, para fins de simulação, construiu-se a partir do SCOR um processo simplificado (baseando-se em alguns processos dos quadros 2, 3 e 4); mas que não

impede novas aplicações utilizando processos mais detalhados.

Dentre as estratégias de colaboração observadas na literatura para problemas de DVRP, foram estudadas neste trabalho a utilização de veículos auxiliares, segundo trabalhos anteriores de Novaes, Burin e Bez (2012), que foi adaptado para funcionar através de agentes na seção 5.3.2.1; e variações na forma de cálculo das propostas durante a negociação entre os veículos (Seção 5.3.2.2). Estas estratégias mostram-se interessantes por avaliar dois aspectos principais no dimensionamento da frota: a eficiência obtida com a utilização de mais veículos e a capacidade dos veículos em lidar com eventos dinâmicos.

As principais vantagens do uso de agentes, em detrimento de outras abordagens, como programação matemática e simulação (sem agentes), é o desenvolvimento de soluções que possuem autonomia e algum nível de inteligência para lidar com problemas complexos. Tais características permitem ganhos com escalabilidade da aplicação e representação mais adequada das unidades decisoras.

A escolha dos indicadores de avaliação das estratégias, discutida na seção 5.3.3, foi feita de maneira a representar os interesses de uma empresa OEM, onde buscou-se medir, principalmente, o nível de serviço e o custo de fornecimento. Para isto, foram utilizados indicadores presentes no modelo SCOR, contudo, outras aplicações podem utilizar novos indicadores, de acordo com os interesses dos decisores envolvidos.

Com relação aos métodos heurísticos utilizados, apresentados no capítulo 3, estes viabilizaram que medidas de reajuste da rota pudessem ser realizadas durante a operação, permitindo assim que os veículos reagissem as percepções recebidas do ambiente. A heurística deste trabalho foi inspirada no trabalho de Burin (2011), nesse trabalho se utilizou uma heurística composta, onde a rota é criada pela heurística de inserção pelo mais distante e melhorada pela heurística 3 – *opt*. Diferentemente da maior parte dos problemas de roteirização dinâmica de veículos, que lidam apenas com a inclusão de novas demandas na rota (PILLAC et al., 2013), esta proposta aborda ainda a ocorrência de congestionamentos e a remoção de tarefas existentes do roteiro.

Para a modelagem do MAS foi utilizada a metodologia Prometheus (PADGHAM; WINIKOFF, 2004), isto viabilizou o desenvolvimento do sistema de modo organizado, sendo utilizada durante todo o processo de implementação do MAS. Essa metodologia permitiu que muitos ajustes e correções na modelagem fossem realizados ainda na fase de análise, antes que o desenvolvimento dos agentes fosse iniciado. Os diagramas elaborados com o uso dessa metodologia facilitaram o entendimento do modelo, sendo úteis para manutenção e desenvolvimento

de futuras aplicações (os diagramas elaborados podem ser encontrados na seção 5.3.4).

Como a aplicação realizada dá-se numa região urbana fictícia, concebida de maneira estocástica com a técnica de *wedge-shape*, a pessoa responsável pela modelagem necessita estender a classe de representação da rede, informando ao modelo as novas características da região. Além disto, novas aplicações devem implicar em ajustes no modelo, levando em consideração novos problemas, requisitos mais específicos das entidades envolvidas, parâmetros de velocidades esperadas, tempos de atendimento esperado, dentre outros parâmetros.

## 6.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Hierarquicamente organizado, a estrutura de agentes proposta modelou uma relação de subordinação dos agentes veículos aos agentes transportadores, de maneira que estes últimos tem o poder de interferir nas operações de seus veículos. Mes, Heijden e Harten (2007) estudaram as diferentes estruturas de controle e apontaram diferentes vantagens e desvantagens da utilização de cada arquitetura. Assim, outros tipo de estrutura que não a hierárquica poderiam ter sido utilizadas, dependendo dos requisitos inicialmente estabelecidos. Mesmo que hierarquicamente superiores, os agentes transportadores possuem comportamentos apenas para lidar com as ordens de início e fim de ciclos de operações, não interferindo demasiadamente na operação dos veículos. Por exemplo, durante uma negociação, os veículos têm liberdade para negociar de acordo com seus interesses e condições individuais.

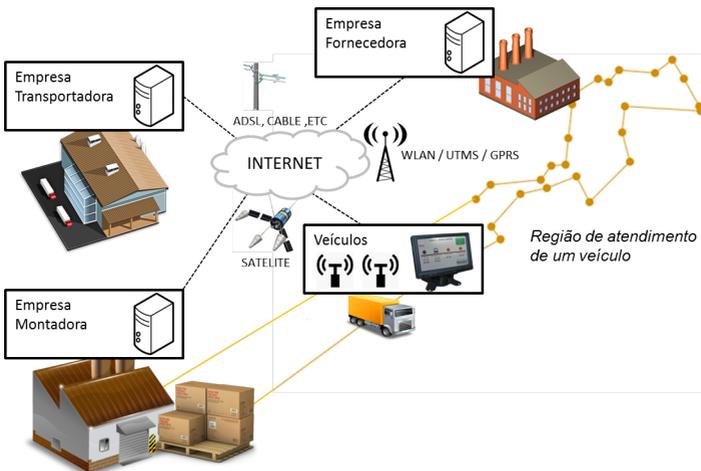
Neste trabalho, apenas foram utilizados agentes veículos e transportadores, abstraindo-se de outros componentes importantes, como, a integração das indústrias fornecedoras. O gerenciamento integrado da cadeia de suprimentos é uma área de estudos promissora, sendo alvo de novos estudos, inclusive com o uso de agentes (TIAN; TIANFIELD, 2006). Entretanto, muitas aplicações observadas na literatura não abordam o nível operacional, o desenvolvimento de aplicações baseadas em agentes envolvendo indústrias e transportadores pode suportar operações mais integradas e capazes de lidar com questões dinâmicas enfrentadas por indústrias e transportadores.

O sistema de gerenciamento dos dados da simulação mostrou-se eficaz no tratamento dos dados da simulação, através deste sistema, foi possível organizar os dados produzidos pela simulação dos experimentos. Além disso, ao observar o gráfico de um ciclo simulado, pode-se

identificar comportamentos indesejados que ficariam escondidos numa análise simples dos indicadores escolhidos.

O desenvolvimento de modelos baseados em agentes resulta não somente numa ferramenta de simulação, mas permite que, com algum esforço computacional, estes agentes sejam implantados em operações reais. Assim, ao avaliar positivamente uma estratégia de colaboração, esta pode ser posta em operação através de uma estrutura de comunicação integrando todas as entidades. A figura 35 ilustra uma rede de comunicação, nesta, os agentes veículos podem ser executados em computadores a bordo dos caminhões, viabilizando que mudanças nas rotas inicialmente planejadas podem ser notificadas ao motorista. Outro aspecto do computador a bordo dos veículos é a captação dos dados de sensores, através dos quais se podem obter informações em tempo real das operações realizadas. Por sua vez, montadoras, transportadores e fornecedores, em geral, também possuem estruturas próprias de sistemas de informação; desse modo, os agentes que representam cada entidade envolvida na negociação podem ser executados em diferentes computadores, desde que conectados ao MAS.

Figura 35 – Infraestrutura de comunicação entre entidades envolvidas nas operações.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, a ferramenta de simulação proposta, em um ambiente mais próximo daquele real de operação, pode ser executada de maneira

distribuída, onde os agentes envolvidos conectam-se através da internet, independentemente do tipo de conexão. A ferramenta pode ser estendida para funcionar como um *middleware*<sup>1</sup> de agentes, reduzindo custos e seguindo padrões da *Foundation of Intelligent Physical Agents* (FIPA). Isto dá suporte ao desenvolvimento de futuras aplicações em empresas, onde o sistema multiagentes pode trabalhar de modo integrado aos sistemas corporativos. Esta característica, fundamental para o desenvolvimento de pesquisas mais próximas de aplicações empresariais, é frequentemente deixada de lado, como verificou-se no referencial bibliográfico apresentado no capítulo 4.

### 6.3 EXPERIMENTOS E CENÁRIOS SIMULADOS

Para experimentação do método proposto (Seção 5.2), foram realizados testes para avaliar algumas estratégias de colaboração. Assim, foi possível utilizar o método para julgar, de acordo com os indicadores, que estratégias alcançam resultados mais interessantes. As estratégias escolhidas para a experimentação do método foram a utilização de veículos auxiliares e de algumas técnicas de negociação.

Dentre as diferentes técnicas de negociação que podem ser utilizadas, optou-se por avaliar diferentes formas de calcular as propostas. Deste modo, o método de negociação inclinava o MAS a diferentes objetivos gerais, como: reduzir a quilometragem total, equilibrar a quilometragem de todos os veículos ou, equilibrar apenas a quilometragem restante a ser percorrida.

Para a avaliação dos experimentos, foram propostos diferentes cenários. Estes observaram o nível de carga inicialmente atribuída aos veículos, podendo ser com ou sem sobrecarga; e a participação, ou não, dos veículos regulares na negociação de tarefas. A realização de experimentos em diferentes cenários permitiu avaliar a eficiência de cada estratégia em outras situações, assim, pode-se verificar que estratégias são mais interessantes em cada cenário.

Quanto ao aspecto escalabilidade, a simulação baseada em agentes permite que os experimentos fossem realizados com pequenos ajustes no modelo. De maneira que alterando os parâmetros estabelecidos na seção 5.4.5, seja possível criar mais distritos, adicionar veículos auxiliares, ou mesmo inserir outros tipos de veículos e transportadores.

---

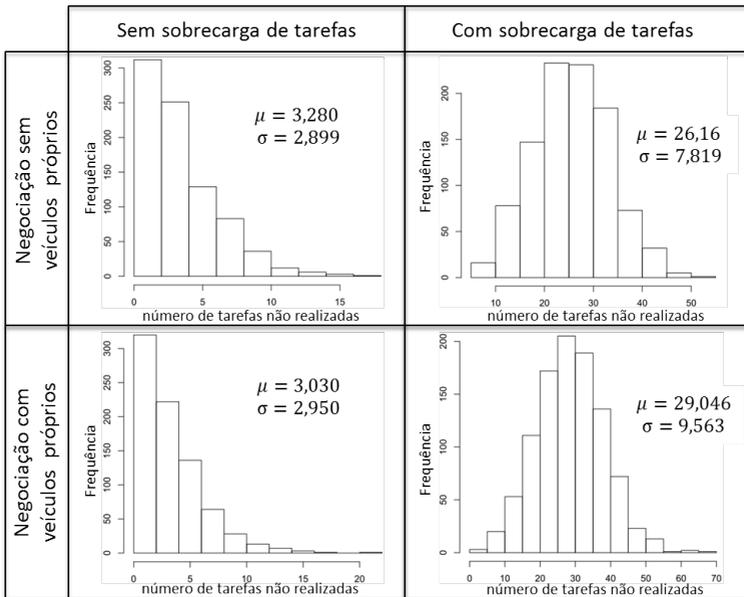
<sup>1</sup>Middlewares' são ferramentas específicas para a transferência de informações entre aplicações ou bancos de dados, estes sistemas abstraem complexidades dos sistemas de origem e destino, facilitando assim a troca de dados (LINTHICUM, 2000).

## 6.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Inicialmente, uma comparação geral entre resultados obtidos nos diferentes cenários simulados já evidencia características interessantes do uso de veículos auxiliares. Observando, por exemplo, um comportamento do tipo 5 (sem veículos auxiliares) e um do tipo 12 (com 7 veículos auxiliares), mostrados figuras 36 e 37, respectivamente. São apresentadas nessas figuras as frequências de tarefas não atendidas

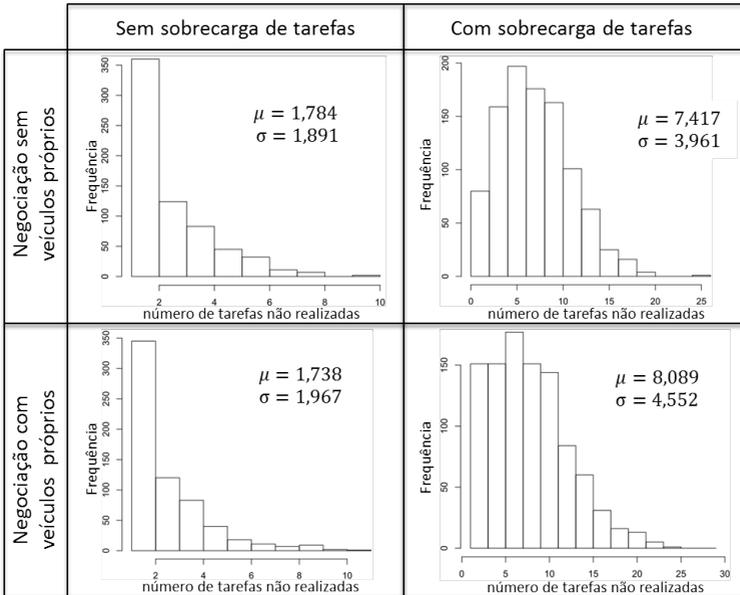
No cenário de “sem sobrecarga de tarefas”, a maior parte dos ciclos apresentou um número reduzido de tarefas não atendidas (próximo de zero), com médias aritméticas ( $\mu$ ) de: 3,28 (para situação sem veículos auxiliares e “sem negociação de veículos próprios”), 3,03 (para situação sem veículos auxiliares e “com negociação de veículos próprios”), 1,784 (para situação com veículos auxiliares e “sem negociação de veículos próprios”), e 1,738 (com auxiliares e “com negociação de veículos próprios”). Por outro lado, com a sobrecarga de tarefas, o número daquelas não atendidas possui médias maiores, de: 26,16 (sem auxiliares e “sem negociação de veículos próprios”), 29,046 (sem auxiliares e “com negociação de veículos próprios”), 7,417 (com auxiliares e “sem negociação de veículos próprios”), e 8,089 (com auxiliares e “com negociação de veículos próprios”). Conclui-se, com isso, que a utilização de veículos próprios durante a negociação não é suficiente para a redução do número de visitas não realizadas e, que a utilização de veículos auxiliares mostra-se importante especialmente nas situações em que sejam observadas sobrecarga de tarefas.

Figura 36 – Histogramas do número de tarefas não realizadas em todos os cenários para um experimento do tipo 5 (sem veículos auxiliares).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Histogramas do número de tarefas não realizadas em todos os cenários para um experimento do tipo 12 (com 7 veículos auxiliares).

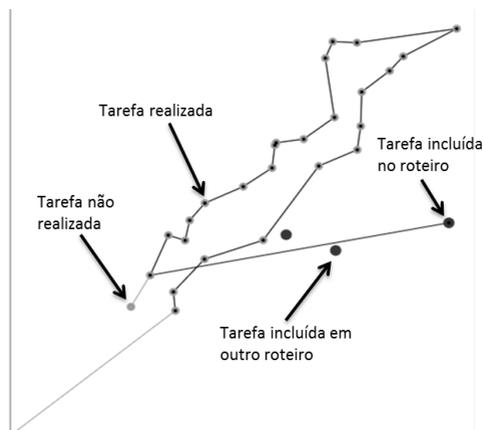


Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda, pode-se observar que o uso de veículos próprios durante o processo de negociação eleva a variabilidade dos resultados, em relação ao indicador número de tarefas não realizadas, como pode ser observado pelo desvio padrão ( $\sigma$ ), que muda de 2,899 para 2,950, no caso sem veículos próprios e sem sobrecarga de trabalho; que passa de 7,819 para 9,563, sem veículos próprios e com sobrecarga de trabalho; que altera de 1,891 para 1,967, com veículos próprios e sem sobrecarga de trabalho; e que muda de 3,961 para 4,552, com veículos próprios e com sobrecarga de trabalho. Este aumento de variabilidade do número de visitas não realizadas está relacionado ao fato dos veículos negociarem livremente durante todo o roteiro. Deste modo, um veículo pode assumir uma nova tarefa e acabar deixando de atender as suas tarefas previamente planejadas. Como os veículos próprios nos cenários avaliados estão com carga de trabalho equilibrada ou com carga extra de trabalho, se receberem novas tarefas podem não ser capazes de realizar as que lhe foram atribuídas inicialmente; isto gera uma ineficiência

maior, uma vez que as tarefas inicialmente atribuídas estão dentro da região de atendimento do veículo e as novas não. Um exemplo deste fato indesejado pode ser observado na figura 38, onde o veículo recebe uma tarefa adicional e deixa de atender uma tarefa que lhe foi inicialmente atribuída, de maneira que se tivesse atendido a tarefa inicialmente prevista, o teria feito com uma menor distância percorrida.

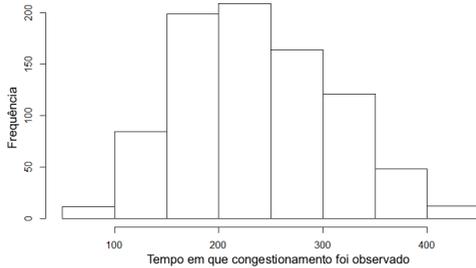
Figura 38 – Exemplo de um roteiro alterado pelas negociações que aumenta a distância percorrida sem aumentar o número de tarefas realizadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A utilização de veículos auxiliares produziu um resultado positivo em todos os casos. Todavia, a transferência das tarefas para os veículos auxiliares pode ser prejudicada pela identificação tardia de congestionamentos. Nos casos em que isto acontece, o tempo para reagir ao evento detectado muitas vezes não é suficiente, como pode ser visto na figura 39.

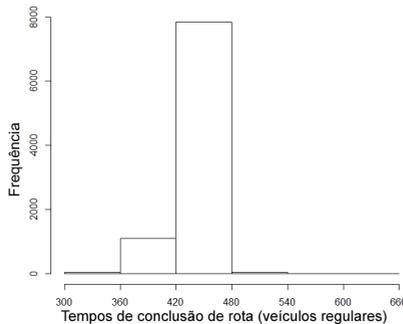
Figura 39 – Exemplo de histograma com a frequência de congestionamentos por intervalo de tempo em um experimento com 1000 ciclos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

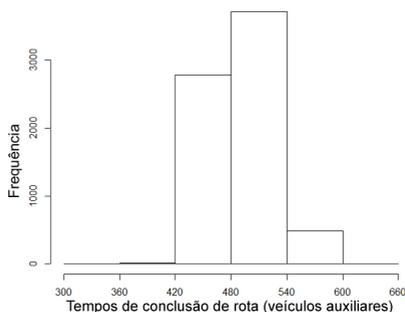
Por estarem no mesmo horizonte de tempo dos veículos próprios os veículos auxiliares podem ter suas operações penalizadas, pois estes podem ficar ociosos no início do ciclo (enquanto não recebem tarefas) e ter de aguardar que todos os veículos próprios iniciem o seu retorno ao depósito. Neste fenômeno, observado nas figuras 40 e 41, percebe-se que poucos veículos próprios extrapolam o limite de tempo estabelecido de 480min (ou 8 horas), enquanto que os veículos auxiliares o fazem com frequência maior.

Figura 40 – Histograma com a frequência de tempos de conclusão de rota dos veículos próprios.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Histograma com a frequência de tempos de conclusão de rota dos veículos auxiliares.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao verificar a quilometragem percorrida pelos veículos auxiliares, percebe-se que essa cresce mesmo quando estes não receberem nenhuma tarefa. Isto acontece devido à tática adotada de enviar antecipadamente os veículos auxiliares para locais estratégicos do distrito, como foi apresentado na figura 12.

Por fim, essas análises exprimem diferentes características dos experimentos simulados. Como apresentado na seção 5.6, permitem ao decisor optar por aquelas com resultados mais próximos de suas expectativas, neste caso, com menores custos e melhores níveis de serviço.

Durante a análise de resultados se observou que a utilização indiscriminada de veículos auxiliares pode acarretar em custos desnecessários e, que o seu dimensionamento depende diretamente da demanda inicialmente atribuída. As estratégias mostraram-se vantajosas quando há uma carga maior de trabalho atribuída aos veículos próprios, assim como quando estes contam com o apoio de veículos auxiliares. Em casos onde a carga de trabalho dos veículos próprios é baixa ou quando não existem veículos auxiliares, o recurso da negociação não se provou tão eficaz, atingindo pequenas melhorias no nível de serviço.

A negociação de tarefas entre veículos, se feita sem um controle supervisão mais apurado, pode ocasionar em transferência de tarefas que não implicarão em melhoria no nível do serviço. Isto dá-se pelo fato de que alguns veículos podem tentar receber tarefas e não serem mais capazes de realizar as tarefas previamente atribuídas (no caso dos veículos próprios). Tal ocorrência implica em ineficiência, uma vez que os resultados poderiam ser melhores se o veículo não recebesse uma nova tarefa, mas continuasse atendendo apenas as tarefas previamente

atribuídas. A utilização de controle humano pode evitar tal problema, sujeitando algumas decisões a uma aprovação de um especialista humano, tal configuração põe o MAS na categoria de um sistema de apoio a decisão.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa apresentou um método para avaliação de estratégias de colaboração na roteirização de veículos através de sistemas multi-agentes. As estratégias de colaboração entre agentes sugeridas serviram para validar o método numa aplicação em operações logísticas de empresas OEM. Os indicadores de desempenho utilizados permitiram avaliar as estratégias de negociação de acordo com o nível de serviço e com os custos relacionados às atividades de roteirização. Assim, foi possível observar os custos associados às estratégias e as melhorias alcançadas por estas.

A fase inicial do método, que identifica os principais requisitos do cliente e as definições de ajustes do modelo, é necessária para tornar o modelo adequado aos interesses dos decisores envolvidos. Para aplicações em cadeias de suprimentos, como a realizada neste trabalho, o modelo SCOR é um modelo de referencia de processos que pode ser útil por descrever as operações de modo detalhado e genérico. Para aplicações em outras áreas, técnicas de mapeamento de processos podem ser necessárias para determinar a forma como os agentes devem operar.

O modelo MAS utilizado permite a simulação de diferentes estratégias, neste trabalho, lidando com problemas de roteirização dinâmica de veículos no contexto de uma empresa OEM. Nesta aplicação o modelo permite que empresas transportadoras e veículos possam interagir para responder de maneira autônoma a eventos não planejados presentes nas operações de transporte de cargas. O funcionamento da ferramenta foi detalhado na seção 5.3, e as estratégias experimentadas estão relacionadas com a negociação entre os veículos (Seção 5.3.2.2) e com o uso de veículos auxiliares para atender às tarefas (Seção 5.3.2.1).

Durante a análise de resultados da simulação, pode-se verificar as estratégias mais relevantes para a aplicação proposta, destacando vantagens e desvantagens de cada estratégia através dos indicadores escolhidos. A ferramenta proposta neste trabalho mostrou-se capaz de representar a operação de empresas OEM através da representação dos agentes transportador e dos agentes veículos. De maneira que os agentes envolvidos foram capazes de fazer uso de ferramentas de pesquisa operacional para tomar decisões autônomas em direção a seus objetivos.

Através deste método, empresas podem reduzir o tempo de análise das estratégias de roteirização dinâmica de veículos, escolhendo mais adequadamente as estratégias de colaboração que devem ser postas em prática para obtenção de melhores rotas, lidando apropriadamente

mente com eventos dinâmicos presentes nas operações de transporte.

O uso de ferramentas de código aberto em todo o processo de desenvolvimento do modelo, a programação em uma linguagem bastante difundida que é a Java, e a utilização do Jade, um *framework* amplamente utilizado; torna este modelo não apenas de mais fácil manutenção, como também de mais fácil adaptação para aplicações nas empresas.

A partir da abordagem apresentada neste trabalho, novos desenvolvimentos na roteirização dinâmica de veículos através de agentes podem avaliar outras estratégias de colaboração, incluindo diferentes tipos de negociação, como, por exemplo, a utilização de leilões. Além disso, novas técnicas de seleção de tarefas a transferir, de cálculo das propostas e de seleção de propostas vencedoras podem ser empregadas. Assim, o cálculo das propostas pode observar não apenas o acréscimo de distância, mas considerar outros aspectos, como: as condições do trânsito, o tempo de serviço adicional esperado e os riscos da realização ou não das visitas. Além disso, as técnicas de avaliação das propostas podem levar em conta os aspectos monetários envolvidos na negociação, a receita bruta obtida com a realização das tarefas e, outras características que influenciem o nível de serviço. Ademais, novos estudos podem ainda discorrer acerca da importância dos clientes, dos riscos envolvidos, dos lucros estimados com a realização das tarefas, etc.

Como neste trabalho a demanda das indústrias foi modelada de forma estocástica, não foram consideradas as interfaces existentes com a indústria, abstraindo-se da complexidade adicional de envolver estes atores. A ferramenta desenvolvida possibilita a implementação de agentes na forma de *web services*, o que oportuniza uma maior integração com os sistemas corporativos. O uso de *web services* pelos MAS pode ser proveitoso para a automação de requisições advindas de outras aplicações, uma vez que agentes podem ser implementados como interfaces com o ambiente externo na forma de *web services*.

Novas aplicações também poderiam investigar modelos com um maior número de rotas próprias, gerando uma maior quantidade de distritos iniciais, avaliando assim, a escalabilidade do modelo. Uma outra questão não verificada neste trabalho é a influência da operação distribuída na rede. As simulações de cada experimento foram realizadas em um único computador, abstraindo-se de aspectos relativos às perdas de mensagens, latência de rede, etc.

Uma outra linha de pesquisa poderia avaliar diferentes políticas de controle supervisorio, criando uma estrutura de controle hierárquica. Neste tipo de estrutura, os agentes de níveis hierárquico mais superiores

podem concentrar mais informações a fim de realizar um planejamento melhor. Entretanto, passa a existir uma relação de dependência dos agentes subordinados aos agentes hierarquicamente superiores, isto reduz a autonomia desses agentes, e pode levá-los a situações indesejadas.

Por fim, sugere-se como trabalho futuro a análise de ciclos de trabalho alternativo para os veículos auxiliares. Neste caso, esses não necessariamente operam no mesmo período dos veículos próprios, de maneira que podem iniciar sua jornada de trabalho algum tempo depois que os veículos próprios já iniciaram e concluí-la a tempo oportuno, mesmo que após o fim do ciclo dos veículos próprios. Esse horizonte de tempo diferenciado pode conferir aos veículos auxiliares um resultado mais coerente, uma vez que eles permanecem menos tempo ociosos no início do período e não necessitam aguardar pela conclusão das rotas regulares (que quase sempre terminarão antes das rotas auxiliares).



## REFERÊNCIAS

- ACCORSI, R.; MANZINI, R.; MARANESI, F. A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 175–186, 2014.
- ADLER, J. L.; BLUE, V. J. A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 10, n. 5-6, p. 433–454, 2002. ISSN 0968-090X.
- ANOSIKE, A. I.; ZHANG, D. Z. An agent-based approach for integrating manufacturing operations. *International Journal of Production Economics*, v. 121, n. 2, p. 333–352, 2009. ISSN 0925-5273.
- ARAGÃO JR, D.; NOVAES, A.; FRAZZON, E.; LUNA, M. Controle de processos logísticos baseado em agentes inteligentes autônomos. In: XXV ANPET. *Anais da XXV ANPET*. Belo Horizonte, 2011.
- ARAGÃO JR, D.; NOVAES, A.; LUNA, M. O uso de agentes no controle da cadeia de suprimentos: uma proposta para sistemas de produção puxada. In: XXVII ANPET. *Anais da XXVII ANPET*. Belem, 2013.
- ARAÚJO, R. R. *Uma abordagem de resolução integrada para os problemas de roteirização e carregamento de veículos*. Tese (Doutorado) — UFRGS, 2010.
- BANKS, J.; CARSON, J.; NELSON, B. L.; NICOL, D. *Discrete-Event System Simulation (4th Edition)*. 4. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2004. Paperback. ISBN 0131446797.
- BASSEVILLE, M.; NIKIFOROV, I. V. et al. *Detection of abrupt changes: theory and application*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, Emerald, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BERTSIMAS, D. *Probabilistic combinatorial optimization problems*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 1988.

- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.
- BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers & Operations Research*, v. 10, n. 2, p. 63–211, 1983.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. *Logística empresarial*. São Paulo: Atlas, 2001.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. *Supply Chain Logistics Management*. New York, USA: Mc Graw Hill, 2002.
- BURIN, P. J. *Roteirização dinâmica de veículos em áreas urbanas congestionadas*. Dissertação (Mestrado) — UFSC, Florianópolis, 2011.
- CAMAZINE, S.; SNEYD, J. A model of collective nectar source selection by honey bees: Self-organization through simple rules. *Journal of Theoretical Biology*, v. 149, n. 4, p. 547 – 571, 1991. ISSN 0022-5193.
- CHRISTOFIDES, N. *Graph theory: An algorithmic approach (Computer science and applied mathematics)*. London. London: Academic Press, Inc., 1975.
- CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 17, n. 6, p. 541–557, dez. 2009. ISSN 0968090X.
- DAI, B.; CHEN, H. A multi-agent and auction-based framework and approach for carrier collaboration. *Logistics Research*, Springer Berlin / Heidelberg, v. 3, n. 2, p. 101–120, 2011. ISSN 1865-035X.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. *Management science*, *Inform*s, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959.
- DARWIN, C.; BEER, G. *The origin of species*. [S.l.]: Books, Incorporated, 1869.
- DAVIDSSON, P.; HENESEY, L.; RAMSTEDT, L.; TÖRNQUIST, J.; WERNSTEDT, F. An analysis of agent-based approaches to transport logistics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 13, n. 4, p. 255–271, 2005. ISSN 0968-090X.

DAVIS, R.; SMITH, R. G. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. *Artificial Intelligence*, v. 20, n. 1, p. 63 – 109, 1983. ISSN 0004-3702.

DOERNER, K.; HARTL, R.; KIECHLE, G.; LUCKA, M.; REIMANN, M. Parallel ant systems for the capacitated vehicle routing problem. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, Springer, p. 72–83, 2004.

DORNIER, P. *Logística e operações globais: textos e casos*. São Paulo: Atlas, 2000.

FAYEZ, M.; RABELO, L.; MOLLAGHASEMI, M. Ontologies for supply chain simulation modeling. In: IEEE. *Simulation Conference, 2005 Proceedings of the Winter*. Orlando, FL, USA, 2005. p. 7–pp.

FIPA. *FIPA Communicative Act Library Specification*. [S.l.], 2002.

FORGET, P.; D'AMOURS, S.; FRAYRET, J.-M. Multi-behavior agent model for planning in supply chains: An application to the lumber industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 24, n. 5, p. 664–679, 2008. ISSN 0736-5845.

FOX, M. S.; BARBUCEANU, M.; TEIGEN, R. Agent-oriented supply-chain management. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Springer, v. 12, n. 2, p. 165–188, 2000.

FRAMLING, K.; ALA-RISKU, T.; KÄRKKÄINEN, M.; HOLMSTRÖM, J. Agent-based model for managing composite product information. *Computers in Industry*, v. 57, n. 1, p. 72–81, 2006. ISSN 0166-3615.

FRAZELLE, E. *Supply chain strategy: the logistics of supply chain management*. United States of America: McGraw-Hill, 2002.

FROHLICH, M. T. e-integration in the supply chain: Barriers and performance. *Decision Sciences*, Blackwell Publishing Ltd, v. 33, n. 4, p. 537–556, 2002. ISSN 1540-5915.

FÜGENSCHUH, A.; MARTIN, A. Computational integer programming and cutting planes. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Elsevier, v. 12, p. 69–121, 2005.

FUJIMOTO, R. M. *Parallel and Distribution Simulation Systems*. 1st. ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000. ISBN 0471183830.

- GOEL, A. *Fleet telematics: real-time management and planning of commercial vehicle operations*. [S.l.]: Springer, 2008.
- GUNASEKARAN, A.; NGAI, E. W. Modeling and analysis of build-to-order supply chains. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 195, n. 2, p. 319–334, 2009.
- GUO, Q.; ZHANG, M. A novel approach for multi-agent-based Intelligent Manufacturing System. *Information Sciences*, v. 179, n. 18, p. 3079–3090, 2009. ISSN 0020-0255.
- GUTKNECHT, O. *Proposition d'un modele organisationnel générique de systemes multi agents*. Tese (Doutorado) — Université Montpellier, 2001.
- HALD, K. S.; MOURITSEN, J. Enterprise resource planning, operations and management: Enabling and constraining erp and the role of the production and operations manager. *International Journal of Operations & Production Management*, Emerald Group Publishing Limited, v. 33, n. 8, p. 1075–1104, 2013.
- HENOCH, J.; ULRICH, H. Agent-based management systems in logistics. *Agent Technologies and Their Application Scenarios in Logistics*, Citeseer, p. 11, 2009.
- HOHPE, G.; WOOLF, B. *Enterprise integration patterns: Designing, building, and deploying messaging solutions*. United States of America: Addison-Wesley Professional, 2004.
- HOSSACK, J. A.; MENAL, J.; MCARTHUR, S. D. J.; MCDONALD, J. R. A multiagent architecture for protection engineering diagnostic assistance. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 2, p. 639–647, 2003. ISSN 0885-8950.
- HUGOS, M. H. *Essentials of supply chain management*. New Jersey, United States of America: Wiley, 2003.
- HWANG, Y.-D.; LIN, Y.-C.; JR, J. L. The performance evaluation of scor sourcing process: The case study of taiwan's tft-lcd industry. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 115, n. 2, p. 411–423, 2008.
- ISERMANN, R. Model-based fault-detection and diagnosis–status and applications. *Annual Reviews in control*, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 71–85, 2005.

ISERMANN, R.; BALLE, P. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, v. 5, n. 5, p. 709 – 719, 1997. ISSN 0967-0661.

JADE. *Jade - Jadeboard Members*. 2013.

<<http://jade.tilab.com/theboard-members.htm>>. Acessado em 18/03/14.

JAIN, L. C.; MARTIN, N. M. *Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications*. [S.l.: s.n.], 1998.

JENNINGS, N. R. Controlling cooperative problem solving in industrial multi-agent systems using joint intentions. *Artificial Intelligence*, v. 75, n. 2, p. 195–240, 1995. ISSN 0004-3702.

JIAO, J.; YOU, X.; KUMAR, A. An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 22, n. 3, p. 239–255, 2006.

JULKA, N.; SRINIVASAN, R.; KARIMI, I. Agent-based supply chain management-1: framework. *Computers & Chemical Engineering*, v. 26, n. 12, p. 1755–1769, 2002. ISSN 0098-1354.

KAIHARA, T. Multi-agent based supply chain modelling with dynamic environment. *International Journal of Production Economics*, v. 85, n. 2, p. 263 – 269, 2003. ISSN 0925-5273.

KARAGEORGOS, A.; MEHANDJIEV, N.; WEICHHART, G.; HÄMMERLE, A. Agent-based optimisation of logistics and production planning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 16, n. 4, p. 335–348, 2003. ISSN 0952-1976.

KOHL, N.; MADSEN, O. B. An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on lagrangian relaxation. *Operations Research, INFORMS*, v. 45, n. 3, p. 395–406, 1997.

KOKKINAKI, A.; ZUIDWIJK, R.; NUNEN, J. van; DEKKER, R. *Information and communication technology enabling reverse logistics*. Springer Berlin, Germany: [s.n.], 2004.

KRAUS, S.; WILKENFELD, J.; ZLOTKIN, G. Multiagent negotiation under time constraints. *Artificial Intelligence*, v. 75, n. 2, p. 297–345, 1995. ISSN 0004-3702.

- KWON, O.; IM, G. P.; LEE, K. C. Mace-scm: A multi-agent and case-based reasoning collaboration mechanisms for supply chain management under supply and demand uncertainties. *Expert Systems with Applications*, v. 34, n. 3, p. 2229 – 2008. ISSN 0957-4174.
- LAI, T. L. Sequential analysis: some classical problems and new challenges. *Statistica Sinica*, Statistical Science, Taipei, Taiwan, v. 11, n. 2, p. 303–350, 2001.
- LANG, N.; MOONEN, H.; SROUR, F.; ZUIDWIJK, R. Multi agent systems in logistics: A literature and state-of-the-art review. 2008.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992.
- LARSEN, A.; MADSEN, O.; SOLOMON, M. Partially dynamic vehicle routing-models and algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, JSTOR, v. 53, p. 637–646, 2002.
- LARSEN, A.; MADSEN, O.; SOLOMON, M. Recent developments in dynamic vehicle routing systems. In: GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S.; WASIL, E. (Ed.). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. US: Springer, 2008, (Operations Research/Computer Science Interfaces, v. 43). p. 199–218. ISBN 978-0-387-77777-1.
- LAU, J. S. K.; HUANG, G. Q.; MAK, K. L.; LIANG, L. Agent-based modeling of supply chains for distributed scheduling. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, *IEEE Transactions on*, v. 36, n. 5, p. 847–861, 2006. ISSN 1083-4427.
- LEE, H. L. Aligning supply chain strategies with product uncertainties. *California Management Review*, v. 44, n. 3, p. 105 – 119, 2002. ISSN 00081256.
- LEITAO, P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 22, n. 7, p. 979 – 991, 2009. ISSN 0952-1976. Distributed Control of Production Systems.
- LI, J.-Q.; MIRCHANDANI, P. B.; BORENSTEIN, D. Real-time vehicle rerouting problems with time windows. *European Journal of Operational Research*, v. 194, n. 3, p. 711–727, maio 2009. ISSN 03772217.

LIANG, W.-Y.; HUANG, C.-C. Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain. *Decision Support Systems*, v. 42, n. 1, p. 390–407, 2006. ISSN 0167-9236.

LIN, B. W. Original equipment manufacturers (OEM) manufacturing strategy for network innovation agility: the case of taiwanese manufacturing networks. *International journal of production research*, Taylor & Francis, v. 42, n. 5, p. 943–957, 2004.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations research*, INFORMS, v. 21, n. 2, p. 498–516, 1973.

LINTHICUM, D. S. *Enterprise application integration*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2000. 377 p.

LONG, Q.; LIN, J.; SUN, Z. Modeling and distributed simulation of supply chain with a multi-agent platform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer London, v. 55, n. 9, p. 1241–1252, 2011. ISSN 0268-3768.

LOPES, F.; WOOLDRIDGE, M.; NOVAIS, A. Negotiation among autonomous computational agents: principles, analysis and challenges. *Artificial Intelligence Review*, Springer Netherlands, v. 29, n. 1, p. 1–44, 2008. ISSN 0269-2821.

LUNA, M. M. M.; FRIES, C. E.; ARAGÃO JR, D. P. Logistics service providers in brazil: A comparison between different developed regions. In: KREOWSKI, H.-J.; SCHOLZ-REITER, B.; THOBEN, K.-D. (Ed.). *Dynamics in Logistics*. Bremen: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 501–511. ISBN 978-3-642-11995-8.

MACIEJEWSKI, M.; NAGEL, K. Towards multi-agent simulation of the dynamic vehicle routing problem in matsim. In: WYRZYKOWSKI, R.; DONGARRA, J.; KARCZEWSKI, K.; WASNIEWSKI, J. (Ed.). *Parallel Processing and Applied Mathematics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, (Lecture Notes in Computer Science, v. 7204). p. 551–560. ISBN 978-3-642-31499-5.

MARTINS, R. A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. p. 47–63. ISBN 978-85-352-4891-3.

MES, M.; HEIJDEN, M. van der; HARTEN, A. van. Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems. *European Journal of Operational Research*, v. 181, n. 1, p. 59–75, 2007. ISSN 0377-2217.

MONOSTORI, L.; VÁNCZA, J.; KUMARA, S. R. Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 697–720, 2006.

Morabito Neto, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. p. 47–63. ISBN 978-85-352-4891-3.

MU, Q.; FU, Z.; LYSGAARD, J.; EGGLESE, R. Disruption management of the vehicle routing problem with vehicle breakdown. *Journal of the Operational Research Society*, Operational Research Society, v. 62, n. 4, p. 742–749, abr. 2011. ISSN 0160-5682.

NEWELL, G. F.; DAGANZO, C. F. Design of multiple-vehicle delivery tours - i a ring-radial network. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 20, n. 5, p. 345 – 363, 1986. ISSN 0191-2615.

NIKOLAI, C.; MADEY, G. Tools of the trade: A survey of various agent based modeling platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 12, n. 2, p. 2, 2009.

NOVAES, A. G. *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

NOVAES, A. G.; BURIN, P. J.; BEZ, E. T. Fault detection in dynamic vehicle routing operations. In: SPRINGER. *Dynamics in Logistics: Third International Conference, LDIC 2012*. Bremen, 2012.

NOVAES, A. G.; BURIN, P. J.; BEZ, E. T.; SCHOLZ-REITER, B. Roteirização dinâmica de veículos usando simulação e algoritmo genético. *TRANSPORTES*, v. 19, n. 3, p. 85–92, 2011.

NOVAES, A. G.; CURSI, J. S. de; SILVA, A. C. da; SOUZA, J. C. Solving continuous location-districting problems with voronoi diagrams. *Computers & Operations Research*, v. 36, n. 1, p. 40 – 59, 2009. ISSN 0305-0548. Part Special Issue: Operations Research Approaches for Disaster Recovery Planning.

NOVAES A. G. N. ; CARVALHO, C. . F. J. O. . T. F. Routing effects on the thermal performance of refrigerated vehicles in the distribution of perishable products. In: WCTR-2013. *World Conference on Transport Research WCTR-2013*. Rio de Janeiro, 2013.

ODELL, J.; PARUNAK, H. V. D.; BAUER, B. Representing agent interaction protocols in uml. In: SPRINGER. *Agent-Oriented Software Engineering*. [S.l.], 2001. p. 201–218.

OU-YANG, C.; HON, S. Developing an agent-based APS and ERP collaboration framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer London, v. 35, n. 9, p. 943–967, 2008. ISSN 0268-3768.

PADGHAM, L.; WINIKOFF, M. *Developing intelligent agent systems: A practical guide*. England: John Wiley & Sons, 2004.

PILLAC, V.; GENDREAU, M.; GUÉRET, C.; MEDAGLIA, A. L. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 225, n. 1, p. 1–11, fev. 2013. ISSN 03772217. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712006388>>.

RABELO, R. J.; CAMARINHA-MATOS, L. M.; AFSARMANESH, H. Multi-agent-based agile scheduling. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 27, n. 1-2, p. 15 – 28, 1999. ISSN 0921-8890. Multi-Agent Systems Applications.

RALPHS, T. K. Parallel branch and cut for capacitated vehicle routing. *Parallel Computing*, Elsevier, v. 29, n. 5, p. 607–629, 2003.

REGAN, A. C.; SONG, J. An industry in transition: third party logistics in the information age. In: KOGAN PAGE. *Proceedings of the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, DC, USA, 2001.

ROBU, V.; NOOT, H.; POUTRÉ, H. L.; SCHIJNDEL, W.-J. van. A multi-agent platform for auction-based allocation of loads in transportation logistics. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 4, p. 3483–3491, 2011. ISSN 0957-4174.

ROORDA, M.; CAVALCANTE, R.; MCCABE, S.; KWAN, H. A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 46, n. 1, p. 18–31, 2010. ISSN 1366-5545.

RUSHTON, A.; CROUCHER, P.; BAKER, P. *The handbook of logistics and distribution management*. Londres: Kogan Page, 2010.

SADEH, N. M.; HILDUM, D. W.; KJENSTAD, D.; TSENG, A. Mascot: An agent-based architecture for dynamic supply chain creation and coordination in the internet economy. *Production Planning & Control*, v. 12, n. 3, p. 212–223, 2001.

SCC. *Supply-Chain Operations Reference-model (SCOR®) Version 9.0*. United States of America: Supply-Chain Council, 2009.

SCHÖNBERGER, J.; KOPFER, H. Autonomous decision model adaptation and the vehicle routing problem with time windows and uncertain demand. *Understanding autonomous cooperation and control in logistics: the impact of autonomy on management, information, communication and material flow*, Springer Verlag, p. 139, 2007.

SCHULDT, A. *Multiagent Coordination Enabling Autonomous Logistics*. Tese (Doutorado) — Universidade de Bremen, Bremen, 2011.

SHEN, W.; HAO, Q.; YOON, H. J.; NORRIE, D. H. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*, v. 20, n. 4, p. 415 – 431, 2006. ISSN 1474-0346.

SHEN, W.; WANG, L.; HAO, Q. Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, v. 36, n. 4, p. 563 –577, July 2006. ISSN 1094-6977.

SMITH, R. G. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *Computers, IEEE Transactions on*, C-29, n. 12, p. 1104–1113, Dec 1980. ISSN 00189340.

SMITH, S. L.; PAVONE, M.; BULLO, F.; FRAZZOLI, E. Dynamic vehicle routing with priority classes of stochastic demands. *SIAM Journal on Control and Optimization*, SIAM, v. 48, n. 5, p. 3224–3245, 2010.

SOROOR, J.; TAROKH, M. J.; SHEMSHADI, A. Initiating a state of the art system for real-time supply chain coordination. *European Journal of Operational Research*, v. 196, n. 2, p. 635–650, 2009. ISSN 0377-2217.

STADTLER, H.; KILGER, C. *Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.

SWAMINATHAN, J. M.; SMITH, S. F.; SADEH, N. M. Modeling supply chain dynamics: A multiagent approach. *Decision Sciences*, Blackwell Publishing Ltd, v. 29, n. 3, p. 607–632, 1998. ISSN 1540-5915.

SYSLO, M. M.; DEO, N.; KOWALIK, J. S. *Discrete optimization algorithms: with Pascal programs*. United States of America: Dover Publications, 2006.

TANIGUCHI, E.; SHIMAMOTO, H. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 12, n. 3-4, p. 235–250, 2004. ISSN 0968-090X.

TEODOROVIC, D. Swarm intelligence systems for transportation engineering: Principles and applications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 16, n. 6, p. 651–667, 2008. ISSN 0968-090X.

TIAN, J.; TIANFIELD, H. Literature review upon multi-agent supply chain management. In: *Machine Learning and Cybernetics, 2006 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 89–94.

TILANUS, B. *Introduction to information systems in logistics and transportation*. [S.l.]: Pergamon, 1997. 338 p.

VIEIRA, C. L. d. S.; COELHO, A. S.; LUNA, M. M. M. ICT implementation process model for logistics service providers. *Industrial Management & Data Systems*, Emerald Group Publishing Limited, v. 113, n. 4, p. 484–505, 2013. ISSN 0263-5577. <<http://dx.doi.org/10.1108/02635571311322757>>.

VOKRINEK, J.; KOMENDA, A.; PECHOUCEK, M. Agents towards vehicle routing problems. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Richland, SC: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010. (AAMAS '10), p. 773–780. ISBN 978-0-9826571-1-9.

WALD, A. Sequential tests of statistical hypotheses. *The Annals of Mathematical Statistics*, The Institute of Mathematical Statistics, v. 16, n. 2, p. 117–186, 06 1945.

WANG, M.; LIU, J.; WANG, H.; CHEUNG, W. K.; XIE, X. On-demand e-supply chain integration: A multi-agent constraint-based approach. *Expert Systems with Applications*, v. 34, n. 4, p. 2683–2692, 2008. ISSN 0957-4174.

WOJTUSIAK, J.; WARDEN, T.; HERZOG, O. Agent-based Pickup and Delivery Planning: The Learnable Evolution Model Approach. In: *Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS), 2011 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8.

WOOLDRIDGE, M. *An introduction to multiagent systems*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2002.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, v. 10, p. 115–152, 1995. ISSN 1469-8005.

XIANG, Z.; CHU, C.; CHEN, H. The study of a dynamic dial-a-ride problem under time-dependent and stochastic environments. *European Journal of Operational Research*, v. 185, n. 2, p. 534–551, 2008. ISSN 0377-2217.

ZEDDINI, B.; TEMANI, M.; YASSINE, A.; GHEDIRA, K. An agent-oriented approach for the dynamic vehicle routing problem. In: *Advanced Information Systems for Enterprises, 2008. IWAISE '08. International Workshop on*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 70–76.

ZHANG, Z. G.; KIM, I.; SPRINGER, M.; CAI, G. G.; YU, Y. Dynamic pooling of make-to-stock and make-to-order operations. *International Journal of Production Economics*, v. 144, n. 1, p. 44 – 56, 2013. ISSN 0925-5273.

**APÊNDICE A – Descrição de códigos de categorias de  
processos e processos do modelo SCOR**



Neste apêndice são apresentados os significados de todas as siglas utilizadas na tabela 1. São listados a seguir todas as categorias de processos e processos presentes no modelo SCOR. Como os processos relacionados ao trabalho foram discutidos no capítulo 2, neste apêndice não é realizada nenhuma discussão acerca de tais processos.

## A.1 CATEGORIAS DE PROCESSOS

- Planejamento:

- $P_1$ : Plan Supply Chain;
- $P_2$ : Plan Source;
- $P_3$ : Plan Make;
- $P_4$ : Plan Deliver;
- $P_5$ : Plan Return.

- Fornecimento:

- $S_1$ : Source Stocked Product;
- $S_2$ : Source Make-to-Order Product;
- $S_3$ : Source Engineer-to-Order Product.

- Fabricação:

- $M_1$ : Make-to-Stock;
- $M_2$ : Make-to-Order;
- $M_3$ : Engineer-to-Order.

- Entrega:

- $D_1$ : Deliver Stocked Product;
- $D_2$ : Deliver Make-to-Stock Product;
- $D_3$ : Deliver Engineer-to-Order Product;
- $D_4$ : Deliver Retail Product.

- Retorno:

- $SR_1$ : Source Return Defective Product;
- $SR_2$ : Source Return MRO Product;
- $SR_3$ : Source Return Excess Product;

- DR<sub>1</sub>**: Deliver Return Defective Product;
- DR<sub>2</sub>**: Deliver Return Defective Product;
- DR<sub>3</sub>**: Deliver Return Excess Product.

- Monitoramento:

- EP**: Enable Plan;
- ES**: Enable Source;
- EM**: Enable Make;
- ED**: Enable Deliver;
- ER**: Enable Return.

## A.2 PROCESSOS

- Planejamento:

- P<sub>1.1</sub>**: Identify, Prioritize and Aggregate Supply Chain Requirements;
- P<sub>1.2</sub>**: Identify, Prioritize and Aggregate Supply-Chain Resources;
- P<sub>1.3</sub>**: Balance Supply Chain Resources with SC Requirements;
- P<sub>1.4</sub>**: Establish & Communicate Supply-Chain Plans;
- P<sub>2.1</sub>**: Identify, Prioritize and Aggregate Product Requirements;
- P<sub>2.2</sub>**: Identify, Assess and Aggregate Product Resources;
- P<sub>2.3</sub>**: Balance Product Resources with Product Requirements;
- P<sub>2.4</sub>**: Establish Sourcing Plans;
- P<sub>3.1</sub>**: Identify, Prioritize and Aggregate Production Requirements;
- P<sub>3.2</sub>**: Identify, Assess and Aggregate Production Resources;
- P<sub>3.3</sub>**: Balance Production Resources with Production Requirements;
- P<sub>3.4</sub>**: Establish Production Plans;

- P<sub>4.1</sub>**: Identify, Prioritize and Aggregate Delivery Requirements;
- P<sub>4.2</sub>**: Identify, Assess and Aggregate Delivery Resources;
- P<sub>4.3</sub>**: Balance Delivery Resources and Capabilities with Delivery Requirements;
- P<sub>4.4</sub>**: Establish Delivery Plans;
- P<sub>5.1</sub>**: Assess and Aggregate Return Requirements;
- P<sub>5.2</sub>**: Identify, Assess, and Aggregate Return Resources;
- P<sub>5.3</sub>**: Balance Return Resources with Return Requirements;
- P<sub>5.4</sub>**: Establish and Communicate Return Plans.

●Fornecimento:

- S<sub>1.1</sub>**: Schedule Product Deliveries;
- S<sub>1.2</sub>**: Receive Product;
- S<sub>1.3</sub>**: Verify Product;
- S<sub>1.4</sub>**: Transfer Product;
- S<sub>1.5</sub>**: Authorize Supplier Payment;
- S<sub>2.1</sub>**: Schedule Product Deliveries;
- S<sub>2.2</sub>**: Process Element: Receive Product;
- S<sub>2.3</sub>**: Verify Product;
- S<sub>2.4</sub>**: Transfer Product;
- S<sub>2.5</sub>**: Authorize Supplier Payment;
- S<sub>3.1</sub>**: Identify Sources of Supply;
- S<sub>3.2</sub>**: Select Final Supplier(s) and Negotiate;
- S<sub>3.3</sub>**: Schedule Product Deliveries;
- S<sub>3.4</sub>**: Receive Product;
- S<sub>3.5</sub>**: Verify Product;
- S<sub>3.6</sub>**: Transfer Product;
- S<sub>3.7</sub>**: Authorize Supplier Payment.

●Fabricação:

- M<sub>1.1</sub>**: Schedule Production Activities;
- M<sub>1.2</sub>**: Issue Material;

- $M_{1.3}$ : Produce and Test;
- $M_{1.4}$ : Package;
- $M_{1.5}$ : Stage Product;
- $M_{1.6}$ : Release Product to Deliver; Waste Disposal
- $M_{1.7}$ : Waste Disposal
- $M_{2.1}$ : Schedule Production Activities;
- $M_{2.2}$ : Issue Sourced / In-Process Product;
- $M_{2.3}$ : Produce and Test;
- $M_{2.4}$ : Package;
- $M_{2.5}$ : Stage Finished Product;
- $M_{2.6}$ : Release Finished Product to Deliver;
- $M_{2.7}$ : Waste Disposal;
- $M_{3.1}$ : Finalize Production Engineering;
- $M_{3.2}$ : Schedule Production Activities;
- $M_{3.3}$ : Issue Sourced / In-Process Product;
- $M_{3.4}$ : Produce and Test;
- $M_{3.5}$ : Package;
- $M_{3.6}$ : Stage Finished Product;
- $M_{3.7}$ : Release Product to Deliver;
- $M_{3.8}$ : Waste Disposal.

- Entrega:

- $D_{1.1}$ : Process Inquiry and Quote;
- $D_{1.2}$ : Receive, Enter and Validate Order;
- $D_{1.3}$ : Reserve Inventory and Determine Delivery Date;
- $D_{1.4}$ : Consolidate Orders;
- $D_{1.5}$ : Build Loads;
- $D_{1.6}$ : Route Shipments;
- $D_{1.7}$ : Select Carriers and Rate Shipments;
- $D_{1.8}$ : Receive Product from Source or Make;
- $D_{1.9}$ : Pick Product;
- $D_{1.10}$ : Pack Product;

- D*<sub>1.11</sub>: Load Vehicle and Generate Shipping Docs;
- D*<sub>1.12</sub>: Ship Product;
- D*<sub>1.13</sub>: Receive and Verify Product by Customer;
- D*<sub>1.14</sub>: Install Product;
- D*<sub>1.15</sub>: Invoice;
- D*<sub>2.1</sub>: Process Inquiry and Quote;
- D*<sub>2.2</sub>: Receive, Configure, Enter and Validate Order;
- D*<sub>2.3</sub>: Reserve Inventory and Determine Delivery Date;
- D*<sub>2.4</sub>: Consolidate Orders;
- D*<sub>2.5</sub>: Build Loads;
- D*<sub>2.6</sub>: Route Shipments;
- D*<sub>2.7</sub>: Select Carriers and Rate Shipments;
- D*<sub>2.8</sub>: Receive Product from Source or Make;
- D*<sub>2.9</sub>: Pick Product;
- D*<sub>2.10</sub>: Pack Product;
- D*<sub>2.11</sub>: Load Product and Generate Shipping Docs;
- D*<sub>2.12</sub>: Ship Product;
- D*<sub>2.13</sub>: Receive and Verify Product by Customer;
- D*<sub>2.14</sub>: Install Product;
- D*<sub>2.15</sub>: Invoice;
- D*<sub>3.1</sub>: Obtain and Respond to RFP/RFQ;
- D*<sub>3.2</sub>: Negotiate and Receive Contract;
- D*<sub>3.3</sub>: Enter Order, Commit Resources and Launch Program;
- D*<sub>3.4</sub>: Schedule Installation;
- D*<sub>3.5</sub>: Build Loads;
- D*<sub>3.6</sub>: Route Shipments;
- D*<sub>3.7</sub>: Select Carriers and Rate Shipments;
- D*<sub>3.8</sub>: Receive Product from Source or Make;
- D*<sub>3.9</sub>: Pick Product;
- D*<sub>3.10</sub>: Pack Product;
- D*<sub>3.11</sub>: Load Product and Generate Shipping Docs;

- D<sub>3.12</sub>**: Ship Product;
- D<sub>3.13</sub>**: Receive and Verify Product by Customer;
- D<sub>3.14</sub>**: Install Product;
- D<sub>3.15</sub>**: Invoice;
- D<sub>4.1</sub>**: Generate Stocking Schedule;
- D<sub>4.2</sub>**: Receive Product at the Store;
- D<sub>4.3</sub>**: Pick Product from Backroom;
- D<sub>4.4</sub>**: Stock Shelf;
- D<sub>4.5</sub>**: Fill Shopping Cart;
- D<sub>4.6</sub>**: Checkout;
- D<sub>4.7</sub>**: Deliver and/or Install.

•Returno:

- SR<sub>1.1</sub>**: Identify Defective Product Condition;
- SR<sub>1.2</sub>**: Disposition Defective Product;
- SR<sub>1.3</sub>**: Request Defective Product Return Authorization;
- SR<sub>1.4</sub>**: Schedule Defective Product Shipment;
- SR<sub>1.5</sub>**: Return Defective Product;
- SR<sub>2.1</sub>**: Identify Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Product Condition;
- SR<sub>2.2</sub>**: Disposition MRO Product;
- SR<sub>2.3</sub>**: Request MRO Return Authorization;
- SR<sub>2.4</sub>**: Schedule MRO Shipment;
- SR<sub>2.5</sub>**: Return MRO Product;
- SR<sub>3.1</sub>**: Identify Excess Product Condition;
- SR<sub>3.2</sub>**: Disposition Excess Product;
- SR<sub>3.3</sub>**: Request Excess Product Return Authorization;
- SR<sub>3.4</sub>**: Schedule Excess Product Shipment;
- SR<sub>3.5</sub>**: Return Excess Product;
- DR<sub>1.1</sub>**: Authorize Defective Product Return;
- DR<sub>1.2</sub>**: Schedule Defective Return Receipt;
- DR<sub>1.3</sub>**: Receive Defective Product (includes verify);

- DR*<sub>1.4</sub>: Transfer Defective Product;
- DR*<sub>2.1</sub>: Authorize MRO Product Return;
- DR*<sub>2.2</sub>: Schedule MRO Return Receipt;
- DR*<sub>2.3</sub>: Receive MRO Product;
- DR*<sub>2.4</sub>: Transfer MRO Product;
- DR*<sub>3.1</sub>: Authorize Excess Product Return;
- DR*<sub>3.2</sub>: Schedule Excess Return Receipt;
- DR*<sub>3.3</sub>: Receive Excess Product;
- DR*<sub>3.4</sub>: Transfer Excess Product.

•**Monitoramento:**

- EP*<sub>1</sub>: Manage Business Rules for Plan Processes;
- EP*<sub>2</sub>: Manage Performance of Supply Chain;
- EP*<sub>3</sub>: Manage Plan Data Collection;
- EP*<sub>4</sub>: Manage Integrated Supply Chain Inventory;
- EP*<sub>5</sub>: Manage Integrated Supply Chain Capital Assets;
- EP*<sub>6</sub>: Manage Integrated Supply Chain Transportation;
- EP*<sub>7</sub>: Manage Planning Configuration;
- EP*<sub>8</sub>: Manage Plan Regulatory Requirements and Compliance;
- EP*<sub>9</sub>: Manage Supply Chain Plan Risk;
- EP*<sub>10</sub>: Align Supply Chain Unit Plan with Financial Plan;
- ES*<sub>1</sub>: Manage Sourcing Business Rules;
- ES*<sub>2</sub>: Assess Supplier Performance;
- ES*<sub>3</sub>: Maintain Source Data;
- ES*<sub>4</sub>: Manage Product Inventory;
- ES*<sub>5</sub>: Manage Capital Assets;
- ES*<sub>6</sub>: Manage Incoming Product;
- ES*<sub>7</sub>: Manage Supplier Network;
- ES*<sub>8</sub>: Manage Import/Export Requirements;
- ES*<sub>9</sub>: Manage Supply Chain Source Risk;
- ES*<sub>10</sub>: Manage Supplier Agreements;

- EM**<sub>1</sub>: Manage Production Rules ;
- EM**<sub>2</sub>: Manage Production Performance;
- EM**<sub>3</sub>: Manage Make Information;
- EM**<sub>4</sub>: Manage In-Process Products (WIP);
- EM**<sub>5</sub>: Manage Make Equipment and Facilities;
- EM**<sub>6</sub>: Manage Transportation (WIP);
- EM**<sub>7</sub>: Manage Production Network;
- EM**<sub>8</sub>: Manage Make Regulatory Environment;
- EM**<sub>9</sub>: Manage Supply Chain Make Risk;
- ED**<sub>1</sub>: Manage Deliver Business Rules;
- ED**<sub>2</sub>: Assess Delivery Performance;
- ED**<sub>3</sub>: Manage Deliver Information;
- ED**<sub>4</sub>: Manage Finished Goods Inventories;
- ED**<sub>5</sub>: Manage Deliver Capital Assets;
- ED**<sub>6</sub>: Manage Transportation;
- ED**<sub>7</sub>: Manage Product Life Cycle;
- ED**<sub>8</sub>: Manage Import /Export Requirements;
- ED**<sub>9</sub>: Manage Supply Chain Deliver Risk;
- ER**<sub>1</sub>: Manage Business Rules for Return Processes;
- ER**<sub>2</sub>: Manage Performance of Return Processes;
- ER**<sub>3</sub>: Manage Return Data Collection;
- ER**<sub>4</sub>: Manage Return Inventory;
- ER**<sub>5</sub>: Manage Return Capital Assets;
- ER**<sub>6</sub>: Manage Return Transportation;
- ER**<sub>7</sub>: Manage Return Network Configuration;
- ER**<sub>8</sub>: Manage Return Regulatory Requirements and Compliance;
- ER**<sub>9</sub>: Manage Supply Chain Return Risk.

## **APÊNDICE B – Descrição técnica do MAS desenvolvido**



Para um melhor entendimento do funcionamento do MAS proposto, serão apresentados alguns diagramas e figuras que ajudem a explicar melhor o código desenvolvido.

## B.1 DIAGRAMA DE CLASSES AUXILIARES UTILIZADAS PELOS AGENTES

Para auxiliar a simulação das operações de transporte pelos agentes, foram desenvolvidas algumas classes para representar a rede de transportes e as rotas a serem realizadas. Nestas classes estão os métodos responsáveis pelo início das operações (`iniciaOperacao`), pelo deslocamento inicial do veículo ao distrito (`chegadaAoDistrito`), pelo deslocamento ao próximo cliente (`deslocamento`), pelo realização do atendimento em cada cliente (`atendimento`) e pelo retorno do veículo ao depósito (`retornoAoDeposito`).

Outros métodos também se fizeram importantes para esta aplicação, permitindo que os agentes pudessem colaborar para realizar as rotas inicialmente planejadas. Tais métodos possuíam diferentes finalidades, como o de testar a capacidade em realizar a rota (`testaCapacidadeRealizarRota`), o que identifica tarefas a transferir (`identificaTarefasParaTransferir`), o que executa a transferência das tarefas (`executaTransferencia`), o que remove uma tarefa da rota (`removerDaRota`), o que insere uma tarefa da rota (`inserirNaRota`) e o que estima a inserção de uma tarefa da rota (`estimarInserirNaRota`).

Como pode ser visto na figura 42, a estrutura de herança implementada nessas classes permite que diferentes aplicações possam ser realizadas, inclusive de diferentes estratégias de colaboração. Esta estrutura viabiliza a reutilização de código, reduzindo os esforços de implementação de novas aplicações e facilitando a realização de ajustes.

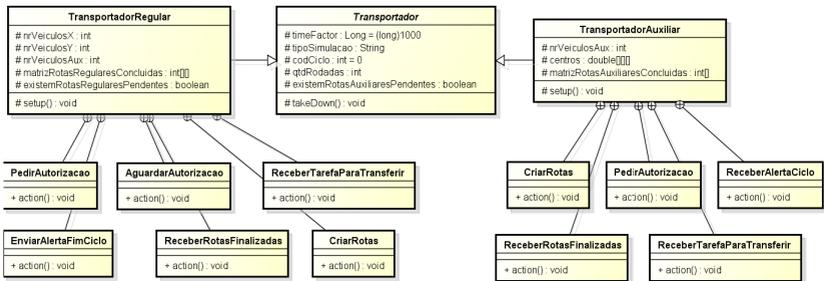
Assim, estas classes são instanciadas pelos agentes, que podem fazer uso de seus métodos para realizar as operações de transportes com uma simples chamada de método.



## B.2 DIAGRAMA DE AGENTES

O diagrama de classes entre os agentes do tipo transportador, figura 43, apresenta a relação entre esses e os comportamentos de cada agente, tais comportamentos na estrutura do Jade também são representados por classes. Como essas classes têm um funcionamento muito particular, não houveram comportamentos compartilhados. Entretanto, ambas compartilham alguns atributos da entidade da qual herdam.

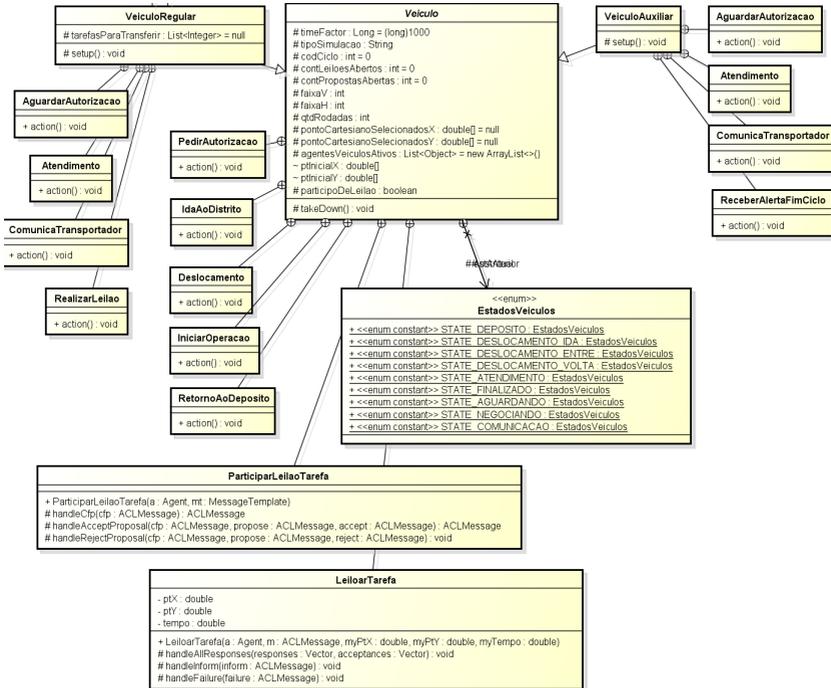
Figura 43 – Modelagem dos agentes transportadores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama de classes entre os agentes do tipo veículos, figura 44, apresenta uma relação de herança em que o agente VeiculoRegular e o agente VeiculoAuxiliar herdam do agente Veiculo diferentes comportamentos (pedir autorização, ida ao distrito, deslocamento, iniciar operação e retorno ao depósito). Além destes, também são herdados os comportamentos para participação no leilão e leiloar tarefas. Por fim, as características de estado dos veículos também é obtida pela classe principal.

Figura 44 – Modelagem dos agentes veículos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### B.3 DIAGRAMA DE ESTADOS

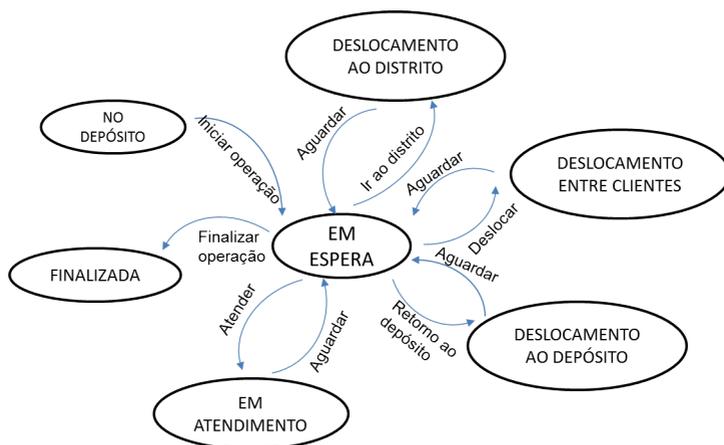
O diagrama de estados apresenta visualmente as possibilidades de transições que podem ser encontradas dentro de cada agentes veículo. Observa-se que o estado em espera é alcançado na chegada ou na saída de qualquer outro estado, isto teve de ser necessário pelo fato da simulação ocorrer paralelamente, isto é, os agentes precisavam operar de maneira sincronizada para que pudessem colaborar durante as operações.

Acerca da implementação realizada neste trabalho, os veículos próprios partem do depósito e seguem imediatamente para o primeiro cliente do distrito. Ao chegar no primeiro cliente, realizam o atendimento deste e seguem para o próximo cliente, fazendo isto até que

todos os clientes tenham sido atendidos ou que não haja mais tempo para a realização do serviço e retorno ao depósito. Por fim, os veículos retornam ao depósito e o ciclo operacional é encerrado.

Os veículos auxiliares realizam suas operações de modo similar, entretanto, não iniciam a operação com um planejamento conhecido, recebendo as tarefas ao longo do tempo. Assim, o funcionamento desses agentes variam na forma como recebem as tarefas dos veículos próprios e no deslocamento inicial realizado. Primeiramente, testou-se a delegação de tarefas por imposição, neste caso o deslocamento inicial é realizado para o centro de massa da região de atuação. Numa outra estratégia, utilizando-se de negociação, o posicionamento dos veículos variam de acordo com a quantidade de veículos auxiliares utilizada, sendo dispersos pela região conforme a figura 12.

Figura 45 – Diagrama de estados.



Fonte: Elaborada pelo autor.