

CARLOS ALBERTO ARAÚJO JÚNIOR

**UM SISTEMA MULTIAGENTE PARA OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE
FLORESTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Araújo Júnior, Carlos Alberto, 1987-
A663s Um sistema multiagente para otimização do transporte
2016 florestal / Carlos Alberto Araújo Júnior. – Viçosa, MG, 2016.
viii, 72f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Helio Garcia Leite.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.66-72.

1. Transporte florestal - Simulação computacional.
2. Planejamento Florestal. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

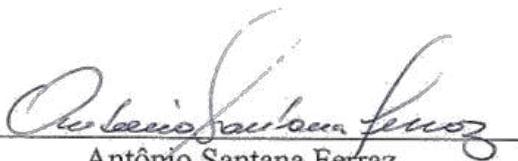
CDD 22. ed. 634.937

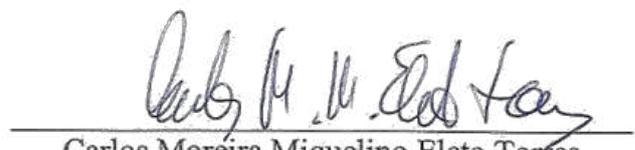
CARLOS ALBERTO ARAÚJO JÚNIOR

UM SISTEMA MULTIAGENTE PARA OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE
FLORESTAL

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de "Doctor Scientiae."

APROVADA: 31 de março de 2016.


Antônio Santana Ferraz


Carlos Moreira Miquelino Eleto Torres


Carlos Pedro Boechat Soares
(Coorientador)


Daniel Henrique Breda Binoti


Helio Garcia Leite
(Orientador)

À Deus,
Aos familiares,
Aos amigos,
Aos mestres.
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida e pelo conforto nos momentos de dificuldades.

A minha família agradeço pelo entendimento e incentivo.

A minha recém noiva, pelo incentivo, carinho e acolhimento nos momentos mais difíceis.

Ao professor e amigo Helio Garcia Leite, pela nova oportunidade, pelos desafios, pela confiança no trabalho, pelos conselhos e, principalmente, pelas risadas.

Ao professor Carlos Pedro Boechat Soares, pelo apoio, pela confiança e pelas discussões estatísticas.

Ao Daniel Binoti pela disponibilidade, contribuição e, mais uma vez, pelo incentivo em relação aos sistemas multiagente.

Aos professores Gilson Fernandes, Carlos Torres, Amaury Souza e Antônio Ferraz pelas considerações sobre o trabalho e pela prontidão em participar das bancas de defesa e qualificação.

Aos amigos do doutorado, do manejo, da econometria e da república, pelo companheirismo.

À Universidade Federal de Viçosa, pelo acolhimento e oportunidade de desenvolvimento do doutorado.

À CAPES, pelo financiamento do estudo.

BIOGRAFIA

Carlos Alberto Araújo Júnior, nasceu em 4 de janeiro de 1987 no município de Diamantina, Minas Gerais.

Viveu por 10 anos em Senador Modestino Gonçalves, Minas Gerais, e por mais 8 anos em Mucuri, Bahia.

Em março de 2005 ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, vindo a colar grau em julho de 2009.

Em agosto de 2010 ingressou no Programa de Mestrado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 14 de fevereiro de 2012.

Trabalhou nas empresas ArcelorMittal BioFlorestas, como analista de planejamento e inventário florestal, e Vallourec Florestal, como coordenador de inventário florestal.

Em agosto de 2014 ingressou no Programa de Doutorado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da tese em 31 de março de 2016.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ANÁLISE DO PROBLEMA DE TRANSPORTE FLORESTAL.....	4
3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE TRANSPORTE FLORESTAL EMPREGANDO SISTEMAS MULTIAGENTE.....	7
4 MODELO CONCEITUAL BASEADO EM SISTEMAS MULTIAGENTE.....	9
4.1 Elementos do mundo real.....	9
4.2 Elementos modelados	9
4.2.1 Ambiente.....	10
4.2.2 Agente Carregador	10
4.2.3 Agente Descarregador.....	11
4.2.4 Agente Transportador	12
4.2.5 Agente Roteador	13
4.2.6 Agente de Controle	15
4.3 Sistema proposto	16
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1 Linguagem de programação Java.....	19
5.2 Plataforma JADE	19
5.3 LPSolve	20
5.4 ArcGis Runtime SDK	20
5.5 Gerenciador de banco de dados.....	21
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
6.1 Gerenciador de Banco de Dados	22
6.2 Descrição do Agente Transportador.....	26
6.3 Descrição do Agente Carregador	29
6.4 Descrição do Agente Descarregador	32
6.5 Descrição do Agente Controlador.....	34
6.6 Descrição do Agente Roteador	42
6.7 Configuração do Sistema	46
6.8 Saídas e Acompanhamento do Sistema Multiagente	47

7 ESTUDOS DE CASO	52
7.1 Otimização da frota de veículos em transporte florestal	52
7.2 Replanejamento do transporte florestal considerando interrupção permanente de trechos na malha viária	55
7.3 Replanejamento do transporte florestal considerando interrupção temporária de trechos na malha viária	58
8 CONCLUSÕES	64
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

RESUMO

ARAÚJO JÚNIOR, Carlos Alberto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2016. **Um sistema multiagente para otimização do transporte florestal.** Orientador: Helio Garcia Leite. Coorientador: Carlos Pedro Boechat Soares.

O presente trabalho tem como objetivo propor e implementar um modelo conceitual de um sistema inteligente, em ambiente georreferenciado, para determinação do dimensionamento de frotas de transporte florestal. Para isso, foi utilizada a ferramenta Sistemas Multiagente, a qual é objeto de estudos da Inteligência Artificial Distribuída. O modelo proposto considera a utilização do mapeamento de plantios (talhões) e estradas florestais, além de informações acerca das capacidades de transporte de diferentes veículos. O sistema é idealizado para se adaptar às alterações que ocorrem ao longo da operação de transporte florestal, tal como a modificação do volume demandado ou inclusão de restrições nas rotas utilizadas pelos veículos. Para sua construção, utilizou-se linguagem de programação em Java associada à biblioteca LPSolve, para cálculos de otimização, à plataforma JADE, para desenvolvimento dos agentes, e ao ArcGis Runtime, para determinação das rotas ótimas de transporte. Foram modelados cinco agentes: agente transportador que representa os veículos de transporte, agente controlador que faz o gerenciamento do sistema, agente roteador que calcula as rotas entre talhões e pátio de estocagem, agente carregador que realiza o controle do carregamento da madeira nos talhões e agente descarregador responsável por receber a madeira no pátio de estocagem. O modelo desenvolvido é capaz determinar a quantidade de caminhões, dentre os veículos disponíveis, que satisfaça as restrições de demanda e de disponibilidade de rotas, tendo como foco a minimização dos custos totais do transporte de madeira. O sistema também consegue se reorganizar frente à alterações nas rotas de transporte ao longo do processamento do mesmo.

ABSTRACT

ARAÚJO JÚNIOR, Carlos Alberto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2016. **A multiagente system to optimal forest transportation.** Adviser: Helio Garcia Leite. Co-adviser: Carlos Pedro Boechat Soares.

This study aims to propose and implement a conceptual model of an intelligent system, in a georeferenced environment, to determine the design of forest transport fleets. For this, was used the multi-agent systems tool, which is the subject of studies of Distributed Artificial Intelligence. The proposed model considers the use of plantation mapping (stands) and forest roads, as well as information about the different vehicle transport capacity. The system was designed to adapt to changes that occur along the forest transport operation, as the modification on volume demanded or inclusion of restrictions on routes used by vehicles. For its construction, was used the Java programming language associated with the LPSolve library, for the optimization calculations, the JADE platform, to develop agents, and the ArcGis Runtime, to determine the optimal transport routes. Five agents were modeled: transporter agent, representing the transport vehicles, controller agent, that makes the system management, router agent, to calculates the route between stands and mill, loader agent, that manage the timber loading in the stands, and unloader agent, responsible for receiving the timber in the storage yard. The model is able to determine the amount of trucks, among the diferents vehicles available, that meets the constraints of demand and availability of routes, with a focus on minimizing total cost of timber transport. The system can also rearrange itself after changes in the transportation routes along the processing.

1 INTRODUÇÃO

O transporte de madeira é uma das atividades que mais onera os custos de produção em empresas florestais. De acordo com Williamson e Nieuwenhuis (1993), até 40% dos custos da madeira posto fábrica são devido aos dispêndios ocasionados pela movimentação do estoque de toras desde os povoamentos até as unidades de produção. A distância entre origem e destino da madeira e o fato de que os veículos de transporte florestal viajam carregados em um único sentido contribuem para elevados custos (MACHADO et al., 2009).

Dentre os fatores que afetam o custo de transporte, a distância percorrida é um dos mais importantes (SILVA et al., 2007), podendo inviabilizar determinados projetos florestais ou diminuir gradativamente a lucratividade dos mesmos. Em função disso, as empresas florestais muitas vezes determinam um raio máximo de plantio ao redor das fábricas, de modo a evitar elevados custos com o transporte da madeira. No entanto, nem sempre isso é possível, seja pela indisponibilidade de terras, seja pelo aumento da demanda ou por alguma inconsistência no planejamento de longo prazo, ocasionando, assim, a necessidade de realização de grandes deslocamentos para manter a fábrica abastecida.

Nessas situações, onde os locais de plantio já estão definidos e as estradas estabelecidas, a redução no custo de transporte pode ser relativamente difícil. Assim, ferramentas de otimização, simulação e sistemas de informação geográfica (SIG) aplicadas ao transporte florestal, tornam-se importantes. Nesse sentido, Lopes et al. (2003) utilizaram o programa SNAP III como ferramenta de apoio ao planejamento da colheita e do transporte florestal. Além de identificar os subsistemas de colheita que deveriam ser utilizados, o software também indicou as melhores rotas de transporte em cada período do horizonte de planejamento. Rix et al. (2014) utilizaram programação linear inteira mista para solucionar o problema de planejamento do transporte florestal considerando duas classes de veículos que deveriam realizar o transporte de diferentes produtos dos povoamentos florestais até as indústrias. No modelo ainda foram consideradas as decisões acerca das rotas e do agendamento dos caminhões.

Ainda, pode-se citar os trabalhos de Berger e Engler (1976), com aplicação do modelo de transporte, Berger et al. (2003), utilizando programação linear, e Troncoso e Garrido (2005), com programação inteira mista. No entanto, na maioria dos casos, o foco foi o planejamento tradicional com utilização de técnicas de pesquisa operacional, as quais geram planos otimizados que então são seguidos pelos setores operacionais das organizações.

Tal operacionalização do planejamento do transporte de madeira é difícil, principalmente em função da ocorrência de eventos não contemplados nos modelos matemáticos utilizados. Mesmo quando o modelador tenta considerar tais eventos, pode-se gerar modelos muito complexos, fazendo com que se tenha um problema combinatorial cuja resolução é mais trabalhosa e exige elevado custo computacional, conforme sugerem Baskent (2001) e Fernandes et al. (2009).

Para contornar tais inconvenientes da pesquisa operacional clássica, ferramentas de inteligência computacional são utilizadas, a exemplo do trabalho de Souza (2004), com emprego de *algoritmos genéticos* (AG). Ainda, técnicas de simulação também têm sido adotadas, tais como *Rede de Petri* (MACHADO et al., 2006) e *dinâmica de sistemas* (JIFENG et al., 2008). No entanto, tais ferramentas ainda podem ser consideradas como pouco robustas, principalmente com relação ao sincronismo com ambientes de processamento georreferenciados, ou quando há necessidade de um monitoramento constante das informações que estão sendo produzidas em tempo real pelas atividades modeladas. De fato, Davidsson e Wernstedt (2002) mencionaram que tais abordagens estáticas são limitadas no caso de fenômenos dinâmicos, como é o planejamento operacional do transporte florestal. Tal constatação demonstra a importância da busca por novas ferramentas para aplicação em problemas de planejamento, o que remete à pesquisas no campo da inteligência artificial (IA).

Nesse contexto, uma área da IA com destaque nos últimos anos é a *inteligência artificial distribuída* (IAD). Por meio desta técnica, o problema é dividido em partes (agentes) capazes de interagir e buscar soluções individuais que concorram para uma melhor solução do problema (KONAR, 2000). A base filosófica da IAD é o comportamento social, ou seja, os vários agentes atuando em um determinado ambiente, seguindo regras para alcançar metas individuais e interagindo entre si para atingir um objetivo global. Ela tem sido utilizada em diversos trabalhos de gerenciamento e ordenamento da produção por meio de *sistemas multiagente* (SMA) (ARAÚJO JÚNIOR, 2012; FIORILLI, 2007; VIEGAS, 1998; BASTOS, 1998; OGLIARI et al., 2005). O emprego de SMA tem sido cada vez mais frequente desde 1990 (FISCHER et al., 1999), principalmente devido aos avanços computacionais e também porque cada processo de uma cadeia de suprimento pode ser modelado como um agente, cada um com suas regras de decisão (FERREIRA, 2009).

Também em gerenciamento de processos logísticos e roteamento de veículos os sistemas multiagente tem sido utilizados. Kohout e Erol (1999) trabalharam com modelagem baseada em agentes para solucionar o problema de roteamento de veículos de transporte de

passageiros em um aeroporto. Neste trabalho, o destaque da abordagem multiagente esteve na possibilidade de tratar o problema de maneira dinâmica, com soluções em tempo real, permitindo que as variações nos parâmetros do modelo pudessem ser consideradas a cada momento.

Tal possibilidade mostra que o paradigma multiagente também oferece uma resposta às limitações das abordagens tradicionais da pesquisa operacional, representando fenômenos complexos e dinâmicos que são difíceis de expressar usando os formalismos matemáticos clássicos (DONIEC et al., 2008), os quais podem ser representados pela suposição de que as variáveis modeladas são estáticas (KOHOUT e EROL, 1999).

Muitos estudos já foram conduzidos com emprego de SMA em problemas de planejamento e gerenciamento de transportes diversos (CHEN e CHENG, 2010). Ainda, o grande número de publicações sobre o uso de SMA para modelagem, análise e solução de problemas de transporte de produtos indica a oportunidade de construção de um modelo e de um sistema multiagente para o caso do transporte de madeira nas empresas florestais. Porém, não foi encontrado trabalho abordando tal ferramenta para planejamento e gestão da cadeia logística de suprimento de madeira de povoamentos florestais.

Dessa maneira, tem-se como problema principal a ser modelado neste trabalho aquele que representa o planejamento do transporte florestal considerando o dimensionamento da frota e a possibilidade de alterações no planejamento ao longo do andamento das operações, gerando uma ferramenta que viabilize a tomada de decisão frente à ocorrência de eventos inesperados no sistema, possibilitando um replanejamento operacional. Tal reprogramação será avaliada por meio da utilização de sistemas multiagente, que irão simular a ocorrência de eventos aleatórios que possam interferir no transporte de madeira do talhão até a unidade de processamento e, então, recalcular as melhores rotas e redimensionar a frota de caminhões.

O sistema desenvolvido modela o comportamento de entidades físicas que compõem a operação de transporte florestal, sendo representadas pelos agentes transportador, carregador, descarregador, roteador e controlador. Além desses, o ambiente foi modelado tendo como base os talhões, as estradas florestais e o pátio de recebimento da madeira. Para avaliar a ferramenta, três estudos de caso foram considerados: otimização da frota de veículos; otimização da frota de veículos com restrição permanente de trechos; e otimização da frota de veículos considerando restrições temporárias de trechos das estradas.

2 ANÁLISE DO PROBLEMA DE TRANSPORTE FLORESTAL

De acordo com Oliveira et al. (2013), transporte florestal é toda movimentação de madeira dos povoamentos até o pátio das fábricas das empresas. Esse transporte pode ser feito por meio ferroviário, dutoviário ou rodoviário, sendo este último o que representa 85% de toda madeira transportada no Brasil (SILVA et al., 2007). O transporte marítimo também vem sendo utilizado através de barcaças na região compreendida entre o norte do Estado do Espírito Santo e o extremo sul do Estado da Bahia (BOTTER et al., 2003).

O transporte é a operação que mais contribui para o custo final da madeira, o que colabora para a pouca expressividade do comércio de madeira entre regiões distantes (SOARES et al., 2010). De fato, para dois povoamentos semelhantes em locais distintos, o valor médio da madeira em pé e os custos de colheita podem ser similares, contudo, o custo de transporte pode variar significativamente, por depender da distância entre os povoamentos e a fábrica (SOUZA, 2004).

Além da distância, outros fatores devem ser considerados em avaliações econômicas e no planejamento do transporte de cargas, tais como a qualidade de estradas, a intensidade de trânsito, a densidade da produção e o produto transportado (BERGER e ENGLER, 1976). Também é necessário avaliar como será a configuração da atividade em termos de terceirização ou primarização do serviço.

De acordo com Leite (2002), no setor de transporte de madeira das empresas florestais a terceirização é mais significativa, com transferência parcial ou integral desta operação para caminhoneiros autônomos e, ou, transportadoras. Ainda segundo o autor, como vantagem da terceirização pode-se considerar o fato de que as empresas florestais não necessitam manter infraestrutura para a manutenção da frota, reduzindo custos fixos e de mão de obra. Assim, três tipos de estratégias podem ser adotados (RIBEIRO e CAIXETA FILHO, 2000): a terceirização total da frota com a contratação de grandes empresas transportadoras; a terceirização total da frota com a contratação de empresas transportadoras de médio e pequeno porte; e a integração vertical parcial com a contratação de pequenas empresas transportadoras. Seguir uma ou outra estratégia dependerá da dependência entre a empresa florestal e as empresas transportadoras, uma vez que os custos oriundos do desabastecimento da fábrica são proporcionais à porcentagem do abastecimento destinado à transportadora em questão (RIBEIRO e CAIXETA FILHO, 2000).

Além da definição do modo de gestão da atividade de transporte de madeira, existe a preocupação com a escolha de rotas mais economicamente viáveis (SEIXAS e WIDMER, 1993) e com a definição do tipo de veículo para cada região ou empresa (SILVA et al., 2007). Nesse sentido, é necessário compreender o ciclo operacional do transporte florestal para cada tipo veicular, o qual pode ser dividido em componentes parciais em função dos tempos operacionais (ALVES et al., 2013):

- *Viagem sem carga*: tempo gasto do pátio até o local de carregamento;
- *Carregamento*: tempo consumido no carregamento do caminhão;
- *Viagem carregado*: tempo gasto do local de carregamento até o pátio de estocagem;
- *Descarregamento*: tempo para retirada da madeira do caminhão.

O ciclo operacional pode ser avaliado pelo estudo de tempos (LEITE et al., 1993) ou pela adoção de um sistema de dados móveis. Nesse aspecto, conforme destacam Roscher et al. (2013), não apenas o monitoramento da frota, mas também o replanejamento de rotas e o controle do processo podem ser realizados. Os autores, avaliando a padrão de transporte de madeira utilizando veículos com e sem sistemas de monitoramento, concluíram que os caminhões monitorados conseguiam atuar em uma maior área de abrangência, principalmente em função da facilidade de redistribuição de ordens de transporte a tais veículos, o que diminui o tempo relacionado às viagens sem carga.

Considerando a grande quantidade de variáveis envolvidas no processo de planejamento do transporte de madeira, é importante empregar ferramentas de programação matemática como instrumentos auxiliares na tomada de decisão para otimizar o transporte florestal, conforme mencionado por Machado et al. (2009). As principais técnicas são a *programação linear* (PL), a *programação inteira* (PI), a *programação dinâmica* (PD) e a *simulação*, sendo o objetivo principal, ao estabelecer os modelos matemáticos, a minimizar o custo de transporte.

Para as empresas florestais, o planejamento do transporte de madeira visa minimizar custos, com precisão nas entregas e manutenção dos estoques (ROSCHER et al., 2013). Tal abordagem, quando feita no contexto da programação linear minimizando os custos de transporte entre várias fontes produtoras e consumidoras, gera o que é denominado como modelo de transporte (BERGER e ENGLER, 1976). De acordo com Hillier e Lieberman (2013), o problema de transporte se refere a distribuir produtos das origens para os destinos de modo a minimizar o custo total de distribuição. O mesmo possui as seguintes hipóteses:

- *Hipótese das exigências*: cada origem tem uma oferta fixa, sendo que toda a oferta deve ser distribuída aos destinos. Cada destino possui uma demanda também fixa e toda demanda deve ser recebida das origens;

- *Hipótese do custo*: o custo de distribuição de unidades de qualquer origem para qualquer destino é diretamente proporcional ao número de unidades distribuídas.

Assim, o modelo teórico para o problema de transporte pode ser escrito como (HILLIER e LIEBERMAN, 2013):

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

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = s_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

em que:

- c_{ij} : o custo unitário de distribuição da origem i para o destino j ;
- x_{ij} : o número de unidades distribuídas da origem i para o destino j ;
- s_i : a quantidade ofertada pela origem i ; e
- d_j : a quantidade demanda pelo destino j .

Arce (1997) utilizou o modelo de transporte para determinar o volume total de madeira, para cada tipo de produto florestal, que deveria ser transportado de cada ponto de produção até cada um dos clientes considerados, de forma a minimizar os custos totais do transporte florestal. Sousa et al. (2002), aplicando o modelo de transporte considerando como origem os plantios florestais em 93 municípios e como destinos quatro indústrias de celulose e papel, constataram que havia uma ineficiência na distribuição espacial das fazendas pertencentes a cada indústria.

Apesar de eficientes, os modelos tradicionais de pesquisa operacional não se constituem bons para modelagem de sistemas complexos, principalmente pela dificuldade em resolver problemas considerados como NP-difíceis. Em virtude disso, ferramentas mais flexíveis tem se mostrado interessantes para a tomada de decisão, conforme discutido por Souza (2004), em trabalho com aplicação de Algoritmos Genéticos para o problema de planejamento do transporte de madeira. Além de AG, o *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, mais conhecido como GRASP, têm sido empregados para o planejamento do transporte de madeira (MOURA e SCARAFICCI, 2008). Outra ferramenta que vem sendo utilizada para planejamento de transporte de cargas é o Sistema Multiagente, conforme demonstrado nos trabalhos de Fischer et al. (1996) e Davidson et al. (2005). Entretanto, no setor florestal tal técnica ainda tem sido pouco abordada para modelagem da cadeia de suprimentos de madeira.

3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE TRANSPORTE FLORESTAL EMPREGANDO SISTEMAS MULTIAGENTE

Um Sistema Multiagente (SMA) é uma comunidade de entidades autônomas que percebem o ambiente, decidem e agem de acordo com seus interesses individuais, cooperando com os outros para atingir objetivos em comum (SUN, 2005). Tais entidades são conhecidas como agentes (WOOLDRIDGE, 2002). Ao invés de utilizar o conhecimento e raciocínio de um único elemento, o objetivo de um SMA é reproduzir o conhecimento e o raciocínio de vários agentes heterogêneos, de maneira coordenada, para solucionar problemas de planejamento (BOUSQUET e LE PAGE, 2004).

Além dos agentes, um sistema multiagente é composto pelo ambiente (VLASSIS, 2003), o qual é tratado como o meio no qual os agentes tem condição de executar suas tarefas, podendo atuar, interagir com outros agentes e receber estímulos (RUSSEL e NORVING, 2004).

Sistemas multiagente simplificam a solução do problema pela divisão do conhecimento necessário em subunidades, pela associação de agentes inteligentes independentes a cada subunidade e pela coordenação das atividades dos indivíduos (BOUSQUET e LE PAGE, 2004). Conforme Davidsson e Wernstedt (2002), o objetivo geral das abordagens baseadas em sistemas multiagente é elaborar um modelo de planejamento e controle em tempo real ou criar um modelo de simulação utilizado para análise ou reengenharia. Para que tal modelo seja construído, pode-se considerar três níveis de atuação (PARUNAK, 2000): *Modelo Conceitual*, que é uma descrição genérica da aplicação proposta; *Experimentos de Simulação* em que a aplicação é testada em um ambiente de simulação, seja com dados reais ou simulados; e *Sistema Implantado*, que indica que o sistema é utilizado no mundo real.

Um modelo baseado na teoria de Sistemas Multiagente foi utilizado por Fischer et al. (1999) para gerar o planejamento e agendamento de ordens de transporte. Nesse estudo, os principais agentes representaram as companhias de transporte (*Shipping Company Agents*) e os caminhões (*Truck Agents*). As companhias foram responsáveis por alocar as ordens de transporte aos caminhões de maneira a minimizar os custos e os caminhões tinham como objetivo realizar o transporte de determinado bem de um local a outro sob restrição de tempo de viagem. Os caminhões ainda poderiam realizar um replanejamento da rota (utilizando o algoritmo de Dijkstra (1959)), em função do fluxo de veículos nas vias, permitindo, assim, que os mesmos trocassem de ordem de transporte entre si quando o objetivo global de atendimento estivesse comprometido. Após algumas simulações, os autores concluíram que o modelo pode

ser utilizado em médias e grandes empresas de transporte, com a vantagem de apresentar grande flexibilidade, tal como a variação dinâmica do número de agentes durante a simulação.

Outro exemplo de estudo empregando Sistema Multiagente é o de Davidsson e Wernstedt (2002), no qual os autores simularam uma cadeia de suprimentos focando na coordenação entre o planejamento da produção e a distribuição dos produtos aos consumidores. A complexidade do problema estudado pelos autores está na consideração de que não era possível saber com muita antecedência a quantidade demandada pelos consumidores em determinado momento, no entanto era necessário produzir a quantidade certa, no tempo correto e distribuir os produtos aos consumidores. O sistema foi modelado em JADE (plataforma para desenvolvimento de agentes em linguagem JAVA) considerando três agentes: *Consumer agent* que informava uma previsão de consumo com base no consumo atual; *Redistribution agent*, o qual gerenciava o estoque de produto, recebendo as demandas do *Consumer agent*; e o *Producer agent* que era responsável pela produção. Os autores concluíram que o sistema foi capaz de equilibrar qualidade do serviço e quantidade de produtos produzida.

4 MODELO CONCEITUAL BASEADO EM SISTEMAS MULTIAGENTE

4.1 Elementos do mundo real

Para modelagem de um sistema baseado na teoria dos SMA, é preciso que o mesmo seja uma abstração do mundo real. Assim, para um problema de planejamento do transporte florestal, é de se esperar que o sistema represente virtualmente os seguintes elementos:

- *Talhões, estradas e pátio de estocagem*: Os talhões representam polígonos existentes em determinada área, que possuem volume de madeira disponível para transporte e que são considerados como pontos de origem da madeira destinada ao pátio de estocagem ou local de consumo. Os mesmos estão conectados entre si e com o pátio de estocagem por meio de estradas. O volume de madeira disponível em cada talhão varia em função das características do mesmo.

- *Caminhões*: o transporte florestal conta com veículos de diferentes capacidades e características. Assim, cada tipo de caminhão possui dimensões, rendimentos e custos operacionais próprios, os quais devem ser analisados para a escolha da melhor combinação para composição da frota a ser utilizada.

- *Máquinas de carregamento e descarregamento de madeira*: as máquinas de carregamento ficam situadas nos talhões e possuem capacidades operacionais próprias. Tais máquinas podem se movimentar para outro talhão quando do término do volume de madeira disponível em determinado local. Já as máquinas de descarregamento ficam localizadas no pátio de estocagem e não contam com a possibilidade de deslocamento para outros locais. Assim como as máquinas de carregamento, possuem capacidades operacionais próprias e que devem ser consideradas.

4.2 Elementos modelados

O sistema multiagente proposto para planejamento e gestão das atividades de transporte florestal é formulado considerando diferentes agentes, cada um com seus objetivos e ações a serem executadas, situados em um ambiente dinâmico. Ele possui agentes dos tipos carregador, descarregador, transportador, roteador e controlador.

4.2.1 Ambiente

O ambiente no qual os agentes estarão inseridos representa um empreendimento florestal contendo os talhões cuja madeira será transportada, as estradas florestais por onde os caminhões irão transitar e o local de recebimento da madeira.

Para permitir a execução das rotinas de cada agente, o ambiente deve ser georreferenciado, o que auxilia na determinação das rotas mais indicadas para o transporte de madeira. Assim, a base cartográfica do mesmo deve ser construída em software específico de geoprocessamento, gerando arquivo compatível com a linguagem de programação utilizada para modelagem dos agentes.

4.2.2 Agente Carregador

Os agentes carregadores representam as máquinas de carregamento de madeira, que se encontram nos talhões que possuem madeira disponível para transporte. São responsáveis pelo gerenciamento do estoque existente no campo. O agente carregador (AC) deve ser parametrizado com a informação de tempo de carregamento por unidade de volume (minutos/m³), o que será necessário para estimar o período pelo qual o agente fica ocupado carregando cada caminhão.

O AC se movimenta de um talhão para outro em função do planejamento de transporte definido anteriormente e fica aguardando a solicitação de carregamento oriunda do agente transportador. Esta solicitação é realizada por meio de mensagem contendo a informação de capacidade de carga do caminhão. Assim, o carregamento dos caminhões somente ocorre se houver volume disponível no talhão. Ao final do carregamento, o agente carregador envia mensagem ao agente transportador liberando-o para a viagem até o pátio de estocagem. Ao término do volume de madeira de um talhão, o agente carregador se desloca para o talhão seguinte. Tal comportamento pode ser observado na Figura 1.

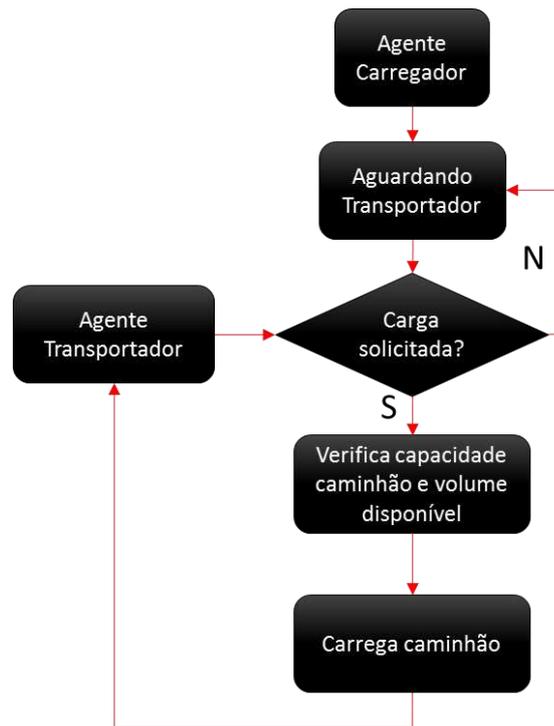


Figura 1 - Fluxograma de comportamento esperado para um agente carregador.

4.2.3 Agente Descarregador

Os agentes descarregadores representam as guias de descarga de madeira no pátio de estocagem. Ao contrário do agente carregador que se movimentava pelo povoamento florestal, o agente descarregador (AD) é considerado como fixo no espaço, ou seja, não há deslocamento das guias de um pátio de estocagem para outro. Tal consideração não impede que futuros sistemas de planejamento de transporte de madeira considerem essa opção.

A função de tal agente é receber a madeira dos caminhões e acomodá-la em local adequado. Para isso, ele fica aguardando a solicitação de descarregamento por parte do agente transportador, a qual deve conter o volume disponível para ser descarregado (Figura 2). Ainda, com base no volume informado pelo agente transportador e na parametrização do agente descarregador em termos de tempo de descarregamento por unidade de volume (minutos/m³), o agente calcula o tempo total necessário para retirar a madeira do caminhão e liberá-lo para uma nova viagem. A liberação ocorre ao final do descarregamento da madeira e é enviada por mensagem ao agente transportador.

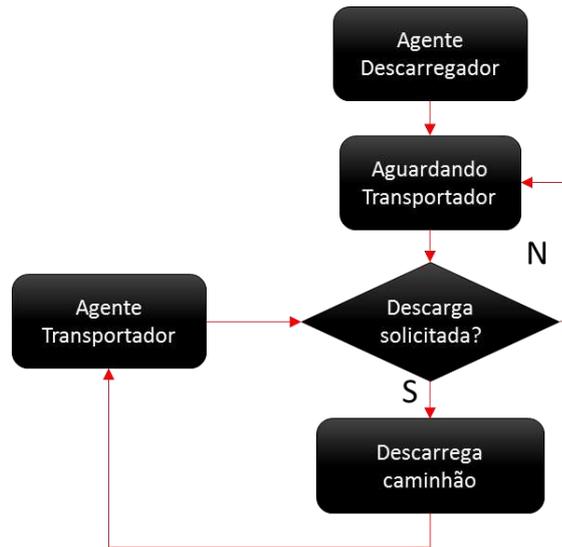


Figura 2 - Fluxograma de comportamento esperado para um agente descarregador.

4.2.4 Agente Transportador

O agente transportador (AT) é aquele que realiza a movimentação da madeira dos talhões até o pátio de estocagem. O mesmo é parametrizado com as informações de capacidade de carga, velocidade de deslocamento vazio, velocidade de deslocamento carregado, tipo de veículo e custos de operação.

Os agentes transportadores são iniciados pelo agente controlador após os cálculos da quantidade ótima de caminhões para transporte. Todos eles começam sua atividade no pátio de estocagem, o que faz com que a primeira viagem sempre seja realizada com o caminhão vazio.

Antes de iniciar a viagem até o povoamento, o agente transportador verifica o planejamento de transporte para saber em qual talhão o agente carregador se encontra (Figura 3). Considerando tais informações, ele envia uma mensagem ao agente roteador indicando as coordenadas da origem e do destino e solicitando que a melhor rota seja calculada entre o pátio e o talhão. Após o retorno do agente roteador, o agente transportador inicia o deslocamento até o local de carregamento de madeira.

Ao chegar no talhão, o agente transportador então solicita ao agente carregador que o caminhão seja carregado, para isso informa sua capacidade de carga. Após o carregamento do veículo, o agente solicita uma nova rota ao agente roteador para retorno ao pátio de estocagem. Essa nova solicitação é importante pelo fato de que durante o carregamento da madeira pode ter ocorrido alguma alteração nas estradas. O agente transportador então se desloca do talhão até o pátio.

No local de descarregamento, o agente transportador então se comunica com o agente descarregador informando a quantidade de madeira disponível no veículo. Ao final da operação de retirada da madeira, o agente transportador é então liberado para uma nova viagem e o ciclo de transporte se reinicia.

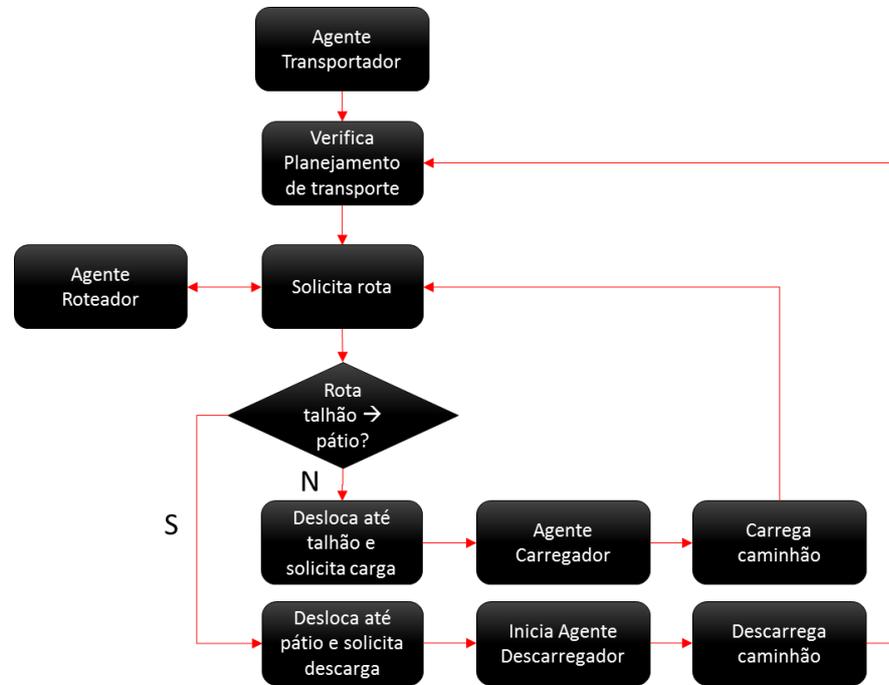


Figura 3 - Fluxograma de comportamento esperado para um agente transportador.

4.2.5 Agente Roteador

Em problemas de planejamento de transporte florestal é imprescindível o conhecimento acerca das distâncias entre cada ponto de origem (talhões no povoamento florestal) e os possíveis destinos da madeira (pátios de estocagem, fábricas, plantas de carbonização). Tal informação é importante pelo fato de que a extensão das rotas é um dos fatores que mais contribui para elevação dos custos do transporte (SILVA et al., 2007). Dessa maneira, a otimização das rotas é necessária não apenas de maneira antecipada, mas também sempre que houver interrupção de parte das vias de movimentação dos caminhões pela ocorrência de eventos inesperados tais como ocorrência de chuvas fortes, queda de pontes e incêndios.

Com isso, um modelo dinâmico para o planejamento do transporte florestal baseado em SMA torna-se mais robusto pela inclusão de um agente roteador (AR). Tal agente deve ser responsável por avaliar as condições das rodovias, indicando os melhores trajetos entre os talhões e os pátios de estocagem sempre que solicitado. A determinação da melhor rota deve

ser feita com base em algoritmos de minimização da distância a ser percorrida entre dois pontos em um mapa, tal como o algoritmo de Dijkstra (1959) utilizado por Fischer et al. (1999).

O agente roteador deve permanecer ativo durante todo o tempo de utilização do sistema. Seu comportamento inicial é o de calcular, para cada talhão, a melhor rota de escoamento da madeira, de modo que tais informações sejam repassadas ao agente de controle para que o mesmo possa determinar o número necessário de caminhões para atendimento da demanda de madeira (Figura 4). Com o início da simulação do transporte de madeira pela inclusão dos agentes transportadores, o agente roteador deve aguardar o pedido de rota por parte de cada caminhão que irá se movimentar no ambiente. Tal solicitação deve conter as coordenadas de origem (local onde está o caminhão) e destino (local para onde o caminhão se desloca, podendo ser o pátio de estocagem ou o talhão cuja madeira está sendo transportada). O agente roteador então, pela avaliação de possíveis impedimentos nas vias, irá calcular a melhor rota e comunicar ao agente transportador solicitante a informação desejada: o direcionamento que deverá ser seguido e o comprimento da rota, além do tempo previsto para a viagem.

Quando da ocorrência de alguma intervenção do usuário no sistema com relação à indicação de um impedimento de estrada, o agente roteador recalcula todas as rotas e então repassa a informação ao agente de controle para uma nova avaliação do número de caminhões necessários. Isso garante que o sistema seja capaz de se replanejar ao longo do tempo de processamento.

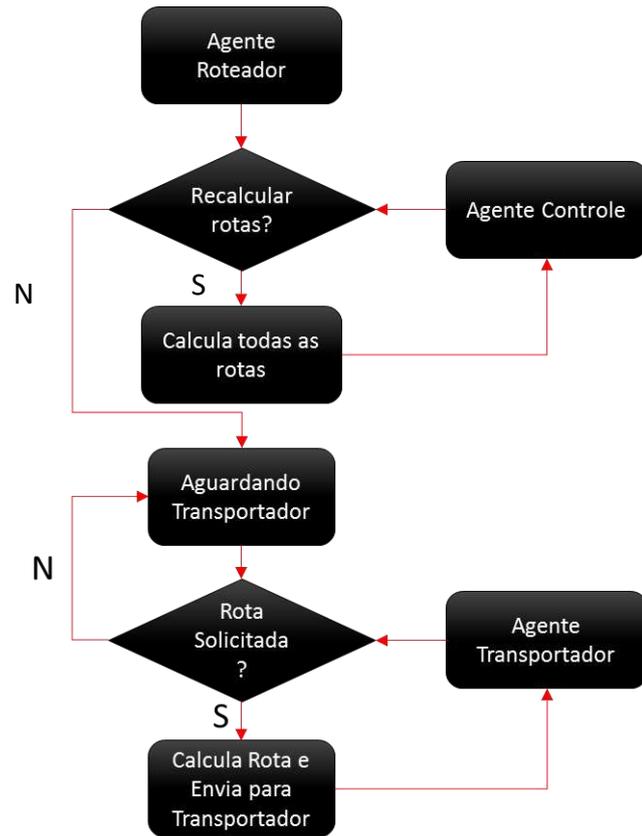


Figura 4 - Fluxograma de comportamento esperado para um agente roteador.

4.2.6 Agente de Controle

O agente de controle (ACO) é aquele que determina o tipo e a quantidade de caminhões necessárias para atendimento da demanda por madeira. Para isso, o agente verifica a situação do ambiente logo após a atuação do agente roteador em relação aos cálculos das melhores rotas entre talhões e pátio de estocagem. Além da distância média das rotas de transporte, o agente de controle verifica a demanda de madeira no pátio de estocagem e as características dos caminhões possivelmente disponíveis para transporte.

Com tais informações, o agente então executa um algoritmo de programação linear inteira para determinar a quantidade inicial de caminhões no sistema. O modelo de PI deverá então buscar uma solução ótima que minimize os custos de transporte sujeito à restrição de demanda de madeira. O mesmo deverá ser da forma:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n C_i X_i \quad (4)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n V_i \geq D \quad (5)$$

$$Q_i \in Z^+ \quad (6)$$

em que:

- V_i : é o volume total transportado pelo caminhão do tipo i em uma hora (m^3/h);
- D : é a demanda de madeira (m^3/h).
- X_i : é a quantidade de veículos do tipo i contratados para o transporte de madeira;
- C_i : é o coeficiente tecnológico, sendo dado por:

$$C_i = c_i V_i \quad (7)$$

em que:

- c_i : é o custo total de transporte de madeira realizado pelo caminhão do tipo i em uma hora (R\$/h);

Após seus cálculos, o agente de controle então inicia os agentes transportadores e continua monitorando o sistema, aguardando uma comunicação do agente roteador quando da ocorrência de algum impedimento de vias no ambiente (Figura 5). Caso ocorra, o agente de controle realiza um novo processamento das informações disponíveis e então avalia a necessidade de incluir novos agentes transportadores para atendimento da demanda por madeira, optando sempre pela alternativa de menor custo.

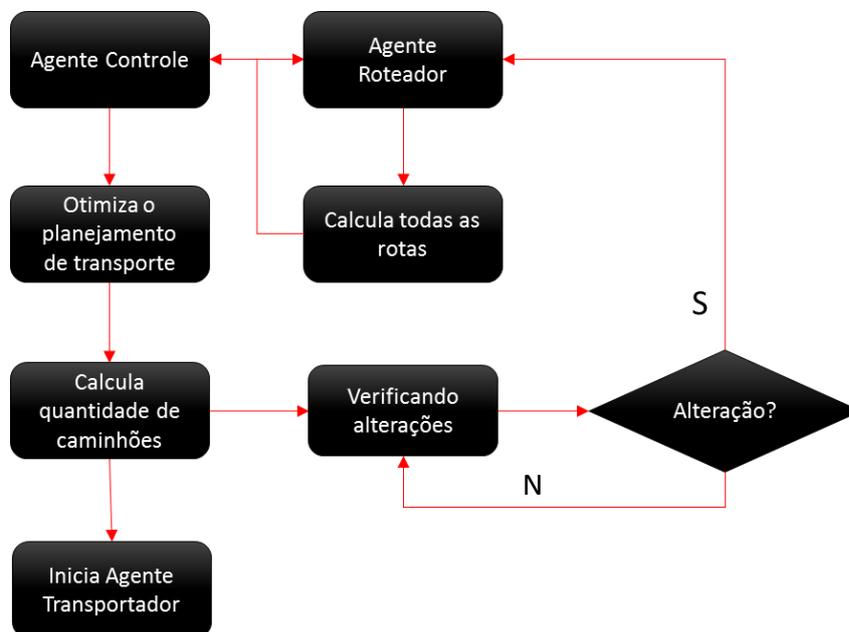


Figura 5 - Fluxograma de comportamento esperado para um agente controlador.

4.3 Sistema proposto

O sistema multiagente proposto para solução do problema de planejamento do transporte florestal contempla a subdivisão do problema em unidades autônomas de

processamento, as quais representam entidades dentro da empresa florestal (Figura 6). As interações entre os agentes no sistema é que irão permitir a avaliação de diferentes cenários de planejamento, os quais poderão contemplar ganhos tecnológicos, redução de custos operacionais e ainda, intervenções que possam ocasionar impedimentos no fluxo de madeira em determinadas rotas.

Para que os resultados do processamento do sistema sejam avaliados, as interações entre os agentes são armazenadas em um banco de dados específico, o que permite a construção de gráficos para acompanhamento em tempo real e ao final de cada ciclo de simulação.

Assim, com o modelo conceitual definido, o passo seguinte é a implementação do mesmo em ambiente de software, conforme será discutido na sequência do trabalho.

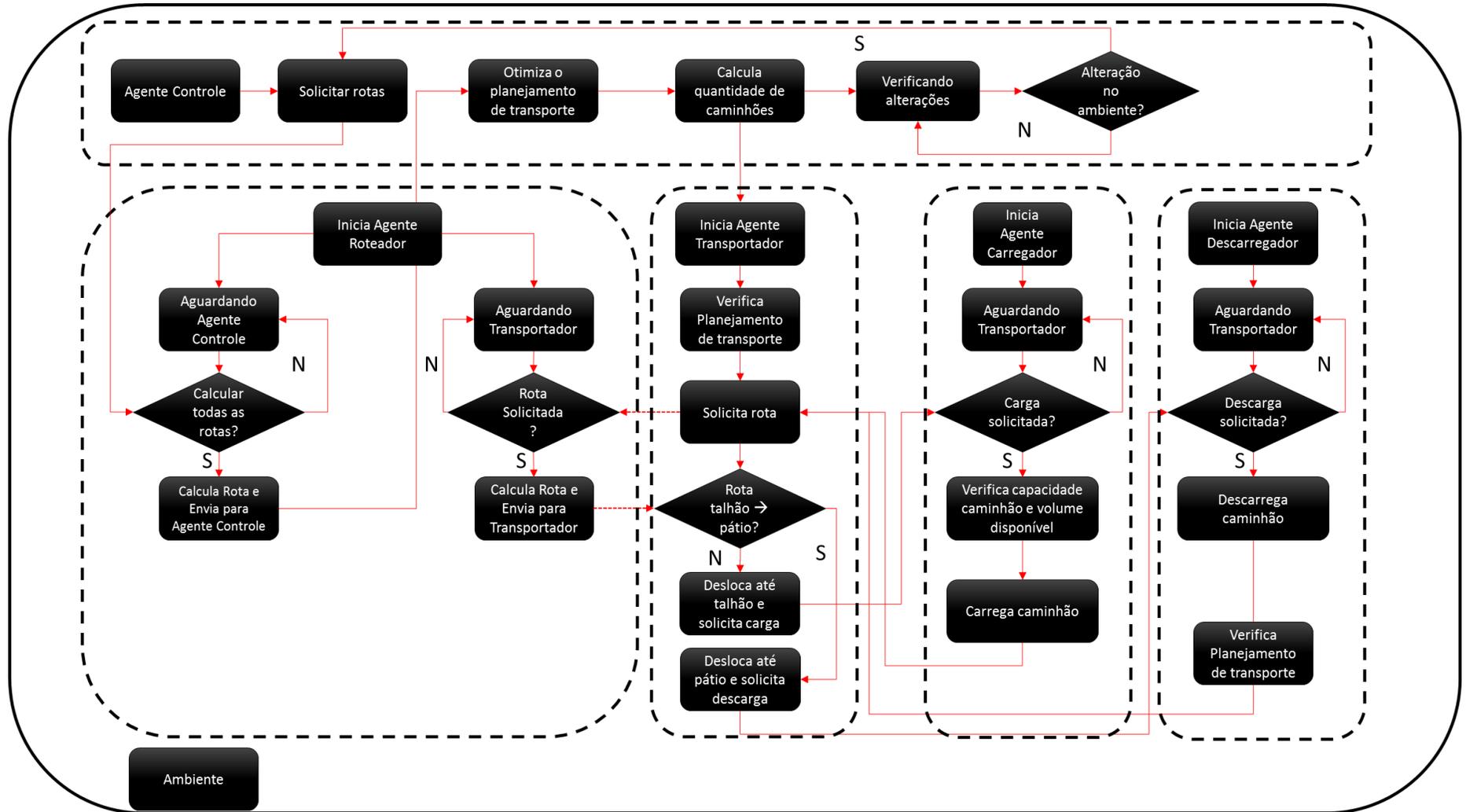


Figura 6 - Interação entre as partes modeladas no Sistema Multiagente proposto.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Linguagem de programação Java

Para implementação do sistema multiagente proposto no modelo conceitual, optou-se pela utilização da linguagem de programação Java. Tal linguagem é caracterizada pela programação orientada a objetos, por possuir ferramentas de desenvolvimento livre e com uma ampla disponibilidade de bibliotecas para agregação ao sistema em desenvolvimento.

Ainda, tem-se que a programação em Java é extensamente empregada em trabalhos que contemplam a construção de sistemas multiagente, conforme descrito em Veiga (2013), Carrasco et al. (2014), Reski et al. (2016) e Almeida et al. (2010), dentre outros.

O software foi construído com a IDE (*Integrated Development Environment*) Netbeans 8.0.2 em ambiente Windows 10. Para programação e testes do sistema, utilizou-se um computador com processador Intel Core i7 com 2.0GHz e memória RAM de 8GB.

5.2 Plataforma JADE

JADE (*Java Agent DEvelopment framework*) é uma plataforma “*open source*” para desenvolvimento de sistemas baseados em agentes que foi idealizada na década de 1990. Durante seu desenvolvimento, foram focadas questões relativas à simplicidade e usabilidade da mesma, de modo a suportar tanto os desenvolvedores experientes quanto os com pouca experiência (BELLIFEMINE, 2007).

Uma das vantagens da JADE é que ela já foi desenvolvida considerando os padrões FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) para a comunicação entre agentes (Wooldridge, 2002). Com isso, os protocolos de troca de mensagens já são previamente configurados, sendo necessário apenas o preenchimento dos parâmetros inerentes à comunicação. Ainda, Oliveira (2008) menciona que JADE torna simples o processo de criação e gerenciamento dos agentes em um sistema em função da disponibilização de ferramentas de interface gráficas.

Em função das características mencionadas, por ser totalmente escrita na linguagem Java e pelo fato de que tal plataforma tem sido utilizada em outros trabalhos encontrados na literatura (Böhnlein et al. (2011), Holmgren et al. (2012) e Zhenggang et al. (2009)) é que a

mesma foi definida para uso neste estudo. A versão considerada foi a JADE v4.3.3 API e pode ser encontrada em JADE (2014).

5.3 LPSolve

O modelo de planejamento e replanejamento do transporte florestal considerado contempla etapas de otimização, nas quais há necessidade de se resolver problemas de programação linear inteira e programação linear inteira binária. Tais problemas são exigidos em duas ocasiões no sistema multiagente proposto:

- ao definir a quantidade de caminhões de cada tipo que devem ser utilizados no transporte florestal;
- ao definir quais talhões deixarão de ser transportados momentaneamente quando ocorre uma interrupção temporária em algum ponto da malha viária.

Procurou-se então desenvolver duas formulações matemáticas que resolvessem tais situações. Desse modo, tornou-se necessário a utilização de uma biblioteca Java que realizasse os cálculos exigidos para solução dos modelos matemáticos encontrados, sendo então escolhida a LPSolve.

LPSolve é um solver de programação linear inteira mista composto pelos algoritmos dos métodos Simplex e Branch and bound. O mesmo é de licença livre (*freeware*) e possui uma API (*Application Programming Interface*) disponibilizada para desenvolvedores e compatível com a linguagem Java. A versão utilizada foi a 5.5 (lpsolve55j.jar) disponível em <http://lpsolve.sourceforge.net>.

5.4 ArcGis Runtime SDK

O ambiente considerando no sistema multiagente proposto é dado pelos talhões de um empreendimento florestal qualquer, pelo pátio de estocagem e pela malha viária que interliga os talhões e o pátio. Dessa maneira, foi necessário utilizar uma biblioteca Java que permitisse a visualização gráfica e georreferenciada do ambiente.

Por isso, foi utilizada a *ArcGis Runtime SDK (Software Development Kit) for Java* para embutir no sistema o mapa da área florestal e funcionalidades que utilizam referência espacial, tal como a localização geográfica dos talhões e pátios, a definição da melhor rota de transporte considerando a ocorrência de barreiras nas estradas e a identificação de pontos de interrupção

de rotas inseridos pelo usuário. Tal API é disponibilizada pela ESRI em sua página dedicada à desenvolvedores de softwares (<https://developers.arcgis.com/java/>).

Para que o sistema importasse os mapas dos talhões e estradas, foi necessário criar um arquivo com extensão *tpk* (*map tile package*) e um geodatabase contendo um *network dataset*, sendo para isso utilizado o software ArcGis versão 10.2.2. O *map tile package* é utilizado para comprimir os diferentes *layers* do mapa em um único arquivo, o qual é importado no sistema multiagente desenvolvido para servir de base para o processamento. Já o *network dataset* é formado por uma rede de arcos conectados, representando as estradas florestais, com regras de conexão e atributos associados tais como comprimento, custos, tempo, direção e hierarquia (Nicoara e Haidu, 2011) e serve de base para a utilização de funções de otimização de rotas. É a partir da estrutura desse arquivo que o sistema irá identificar as melhores alternativas de escoamento da madeira ao longo do período de transporte florestal.

5.5 Gerenciador de banco de dados

Para que os dados utilizados durante o processamento do sistema multiagente estivessem prontamente disponíveis para consulta, foi desenvolvido um sistema de gerenciamento de banco de dados. Para isso, utilizou-se a biblioteca Java DB que utiliza o banco de dados de código aberto Apache Derby e suporta consultas na linguagem SQL (*Structured Query Language*). Isso permite que todos os dados necessários estejam armazenados em um único local.

Além de tais dados, todos os resultados encontrados ao longo do processamento do sistema foram inseridos no mesmo banco de dados, de modo que os resultados pudessem ser graficamente representados pelo sistema e se tornassem disponíveis para posterior análise.

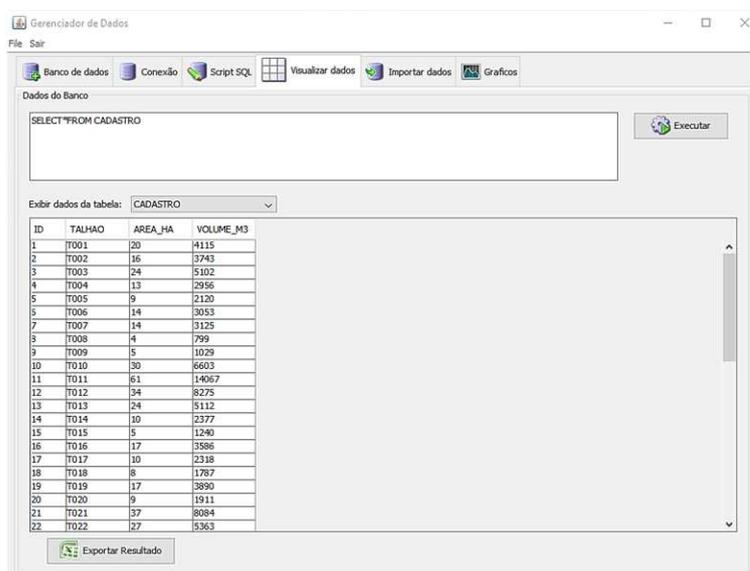
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Gerenciador de Banco de Dados

Abordagens multiagente que utilizam bancos de dados relacionais para auxiliar o processamento do sistema podem ser encontradas em Zhenggang et al. (2009). De fato, um sistema inteligente consiste de uma base de conhecimento, de um processo de inferência e de um banco de dados (KONAR, 2000) que pode ser estático ou dinâmico. No caso deste trabalho, houve a necessidade de que o banco de dados fosse dinâmico, de maneira a acompanhar a evolução do ambiente ao longo do processamento do sistema multiagente.

O banco de dados construído possui tabelas que auxiliam o sistema multiagente durante o processamento do mesmo, de maneira a permitir uma consulta às informações necessárias bem como a publicação dos resultados ao longo da atividade do sistema. O mesmo apresenta as seguintes tabelas:

- *Cadastro*: a tabela de cadastro contém informações sobre a área de cada talhão e o volume de madeira total que deve ser transportado (Figura 7).



The screenshot shows a window titled 'Gerenciador de Dados' with a menu bar (File, Saír) and a toolbar with icons for 'Banco de dados', 'Conexão', 'Script SQL', 'Visualizar dados', 'Importar dados', and 'Graficos'. The main area displays a SQL query 'SELECT * FROM CADASTRO' and a table of data. The table has columns 'ID', 'TALHAO', 'AREA_HA', and 'VOLUME_M3'. Below the table is a button 'Exportar Resultado'.

ID	TALHAO	AREA_HA	VOLUME_M3
1	TO01	20	4115
2	TO02	16	3743
3	TO03	24	5102
4	TO04	13	2956
5	TO05	9	2120
6	TO06	14	3053
7	TO07	14	3125
8	TO08	4	799
9	TO09	5	1029
10	TO10	30	6603
11	TO11	61	14067
12	TO12	24	8275
13	TO13	24	5112
14	TO14	10	2377
15	TO15	5	1240
16	TO16	17	3586
17	TO17	10	2318
18	TO18	8	1767
19	TO19	17	3890
20	TO20	9	1911
21	TO21	37	8084
22	TO22	27	5363

Figura 7 - Tela do gerenciador de banco de dados com visualização dos dados da tabela *Cadastro*.

- *Planejamento*: tabela responsável por conter os dados de cada talhão em relação à sequência de transporte; coordenadas de cada talhão; volume total de madeira de cada talhão, em m³; volume atual de madeira já transportada, em m³; a distância de transporte entre talhão e pátio, em km; a indicação de que o talhão deve ou não ser transportado (Figura 8). Tal tabela é consultada pelos agentes inseridos no sistema de maneira a direcionar a movimentação dos

mesmos no ambiente, sendo ainda a base para o dimensionamento da frota e para o tempo de permanência do agente carregador em cada talhão.

TALLHÃO	SEQUENCIA	TIPO	X	Y	VOLUME	VOLUMEATUAL	DISTANCIA	TRANSPORTAR	RESTRICAO TEMP
T001	1	ORIGEM	1048500	7976300	4115	990	26	S	0
T002	2	ORIGEM	1048500	7976100	3743	0	25	S	0
T003	3	ORIGEM	1048500	7975800	5102	0	25	S	0
T004	4	ORIGEM	1048800	7975600	2956	0	24	S	0
T005	5	ORIGEM	1049200	7975600	2120	0	24	S	0
T006	6	ORIGEM	1049200	7976300	3053	0	24	S	0
T007	7	ORIGEM	1049300	7976100	3125	0	24	S	0
T008	8	ORIGEM	1049300	7975900	799	0	24	S	0
T009	9	ORIGEM	1049591	7975800	1029	0	23	S	0
T010	10	ORIGEM	1049906	7976900	6603	0	25	S	0
T011	11	ORIGEM	1050206	7976700	14067	0	25	S	1
T012	12	ORIGEM	1049976	7976300	8275	0	24	S	0
T013	13	ORIGEM	1049976	7976000	5112	0	24	S	0
T014	14	ORIGEM	1049976	7975800	2377	0	23	S	0
T015	15	ORIGEM	1049776	7975500	1240	0	23	S	0
T016	16	ORIGEM	1050076	7975100	3586	0	23	S	1
T017	17	ORIGEM	1050476	7975700	2318	0	23	S	1
T018	18	ORIGEM	1050576	7975500	1767	0	23	S	1
T019	19	ORIGEM	1050576	7975100	3890	0	23	S	1
T020	20	ORIGEM	1050876	7976500	1911	0	25	S	0
T021	21	ORIGEM	1050876	7975900	8084	0	24	S	1
T022	22	ORIGEM	1050876	7975500	5363	0	23	S	1

Figura 8 - Tela do gerenciador de banco de dados com visualização dos dados da tabela *Planejamento*.

- *Caminhoes*: tabela que contém as informações detalhadas de cada tipo de caminhão considerado no sistema, tais como: tipo de caminhão; a capacidade de carga, em m³; a velocidade de movimentação quando carregado, em km/h; a velocidade de movimentação quando vazio, em km/h; o custo médio de transporte, em R\$/m³km; e a indicação de se utilizar ou não determinado tipo durante o processamento do sistema (Figura 9). Tal tabela é utilizada pelo agente controlador para determinar o dimensionamento da frota e para inserir os agentes transportadores no ambiente.

ID	CAMINHAO	CAPACIDADE_M3	VEL_CARREGADO	VEL_VAZIO	CUSTO	UTILIZAR
1	4x2	30.0	80.0	100.0	0.3	0
2	6x2	45.0	37.0	47.0	0.4	1
3	Silren	80.0	32.0	44.0	0.5	0
4	Articulado	80.0	34.0	44.0	0.6	0

Figura 9 - Tela do gerenciador de banco de dados com visualização dos dados da tabela *Caminhoes*.

- *Configuracoes*: tabela que contém as variáveis diversas que são utilizadas pelo sistema para cálculos ou registro de dados para uso posterior, tal como a localização dos arquivos de mapeamento e o custo em se alterar a frente de transporte em determinado momento (Figura 10).

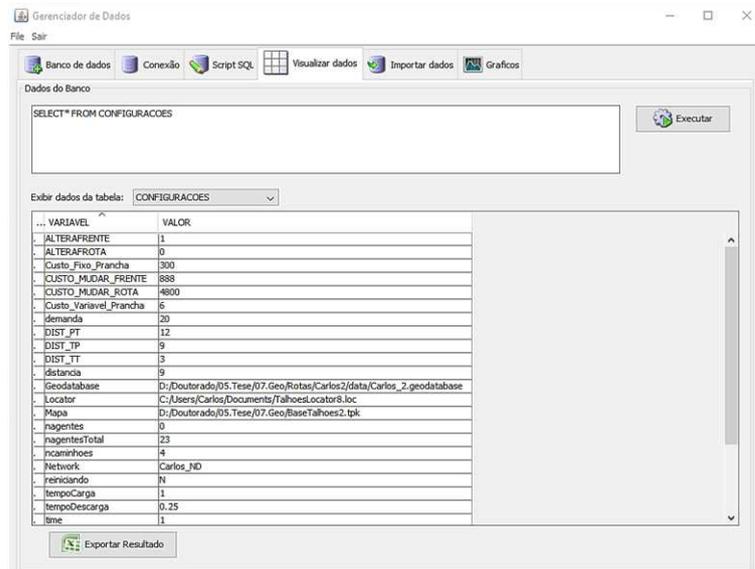


Figura 10 - Tela do gerenciador de banco de dados com visualização dos dados da tabela *Configuracoes*.

- *Controle*: tabela que serve para registro da movimentação realizada pelos agentes transportadores. Cada vez que um agente transportador realiza um ciclo de transporte (viagem vazio, carregamento, viagem carregado e descarregamento), um registro é adicionado à tabela contendo os seguintes valores: nome do agente que realizou a tarefa; capacidade de carga do caminhão; volume acumulado no processo de transporte, em m³; o talhão de origem da madeira; o volume de madeira do talhão; o número da viagem; data e hora do registro; e a distância entre pátio e talhão percorrida pelo agente transportador na viagem correspondente (Figura 11). Alguns dos gráficos de saída do sistema são construídos a partir da consulta das informações registradas em tal tabela.

CAMINHAO	VOLUME_CARGA	VOLUME_ENVIADO	TALHAO	VOLUME_TALHAO	NVIAGEM	DATA	HORA	DISTANCIA
CaminhaosX2_01	45	45	T001	4115	1	04/03/2016	15:17:17	26
CaminhaosX2_01	45	90	T001	4115	2	04/03/2016	15:17:19	26
CaminhaosX2_01	45	135	T001	4115	3	04/03/2016	15:17:20	26
CaminhaosX2_01	45	180	T001	4115	4	04/03/2016	15:17:22	26
CaminhaosX2_01	45	225	T001	4115	5	04/03/2016	15:17:24	26
CaminhaosX2_01	45	270	T001	4115	6	04/03/2016	15:17:26	26
CaminhaosX2_01	45	315	T001	4115	7	04/03/2016	15:17:27	26
CaminhaosX2_01	45	360	T001	4115	8	04/03/2016	15:17:29	26
CaminhaosX2_01	45	405	T001	4115	9	04/03/2016	15:17:30	26
CaminhaosX2_01	45	450	T001	4115	10	04/03/2016	15:17:32	26
CaminhaosX2_01	45	495	T001	4115	11	04/03/2016	15:17:34	26
CaminhaosX2_01	45	540	T001	4115	12	04/03/2016	15:17:35	26
CaminhaosX2_01	45	585	T001	4115	13	04/03/2016	15:17:37	26
CaminhaosX2_01	45	630	T001	4115	14	04/03/2016	15:17:38	26
CaminhaosX2_01	45	675	T001	4115	15	04/03/2016	15:17:40	26
CaminhaosX2_01	45	720	T001	4115	16	04/03/2016	15:17:42	26
CaminhaosX2_01	45	765	T001	4115	17	04/03/2016	15:17:49	26
CaminhaosX2_01	45	810	T001	4115	18	04/03/2016	15:17:51	26
CaminhaosX2_01	45	855	T001	4115	19	04/03/2016	15:17:52	26
CaminhaosX2_01	45	900	T001	4115	20	04/03/2016	15:17:54	26
CaminhaosX2_01	45	945	T001	4115	21	04/03/2016	15:17:56	26
CaminhaosX2_01	45	990	T001	4115	22	04/03/2016	15:17:58	26

Figura 11 - Tela do gerenciador de banco de dados com visualização dos dados da tabela *Controle*.

- *Restricoes*: a tabela de restrições é utilizada para registrar cada interrupção de rota inserida pelo usuário no sistema ao longo do processamento. É por tal tabela que o agente controlador acompanha o andamento da restrição imposta. A tabela é composta pelos campos de: identificação do tipo de restrição inserida, podendo ser temporária ou permanente; identificação do ícone inserido no mapa representando a restrição; da identificação da barreira inserida no sistema para identificação da restrição de rota; do intervalo de tempo pelo qual a restrição estará ativa; e pela indicação de que a restrição está ativa ou não ativa (Figura 12).

ID	TIPORESTRICAO	ICONE_ID	BARREIRA_ID	TEMPO_HORAS	ATIVO
1	Temporaria	763	762	1	S

Figura 12 - Tela do gerenciador de banco de dados com visualização dos dados da tabela *Restricoes*.

6.2 Descrição do Agente Transportador

Conforme discutido no modelo conceitual do SMA proposto, o agente transportador é aquele que representa cada veículo de carga responsável pela movimentação do estoque de madeira do campo para o pátio de estocagem utilizando as estradas florestais disponíveis. Em trabalhos que modelam a atividade de transporte por meio do paradigma multiagente, o agente transportador tem papel fundamental, tal como observado em Zhenggang et al. (2009), para problemas de roteamento veicular com janela de tempo, Filho e Ribeiro (2014), para determinação da frota ótima de veículos para transporte urbano, e Bohnlein et al. (2011), para o problema de distribuição de produtos. No entanto, pode ser que o veículo não necessariamente seja tratado como um agente mas sim como um componente do sistema (HOLMGREN et al., 2012).

Pelo fato de que o agente transportador apenas consegue realizar suas tarefas mediante a comunicação com os agentes carregador, descarregador e roteador, e em função de que a quantidade de agentes de transporte depende do processo de otimização realizado pelo agente controlador, o mesmo é o último a ser inserido no ambiente modelado.

Ao ser iniciado, o agente transportador então armazena na memória suas características principais, sendo: tipo de caminhão que o mesmo representa; capacidade de carga (m³); velocidade média sem carga (km/h); e velocidade média com carga (km/h). Esses atributos são obtidos a partir da busca no banco de dados do sistema, por meio da tabela *Caminhoes*. A determinação dos atributos considerados para cada agente dependem de como o pesquisador os modela e do problema em questão. A título de exemplo, ao modelar um agente caminhão, Baykasoglu e Kaplanoglu (2011) consideraram os seguintes atributos: nome, capacidade volumétrica, capacidade de carga, posição e estado.

Feito isso, o agente transportador registra seu serviço no sistema de modo que outros agentes possam encontrá-lo (BELLIFEMINE, 2007). Para o caso do agente transportador, seu serviço é “Transportar madeira”. Em seguida, o agente inicia o comportamento de espera por mensagens de outros agentes do sistema. Tal comportamento é dado pelo método *addBehaviour*, sendo neste caso utilizado o tipo *CyclicBehaviour* que é aquele que permite que a ação seja executada durante todo o ciclo de vida do agente (BELLIFEMINE, 2007). Ao receber uma determinada mensagem, o agente então a decodifica e toma sua decisão em função das informações que lhe são passadas e de seu raciocínio (Figura 13). As seguintes mensagens que despertam algum tipo de reação do agente transportador são:

- **Ativar**: ao receber uma mensagem com o título igual a “Ativar”, o agente transportador busca, via comando SQL aplicado à tabela *Planejamento*, o talhão que está sendo transportado no momento e suas respectivas coordenadas. Com isso, ele envia uma mensagem ao agente roteador, com o título “Aguardo Rota $P \rightarrow T$ ”, informando as coordenadas do pátio de estocagem e do talhão de destino do caminhão e solicitando que o mesmo calcule a melhor rota entre o pátio e o talhão.

- **Distância $P \rightarrow T$** : se a mensagem recebida pelo agente transportador possuir título igual a “Distância $P \rightarrow T$ ”, o agente então recupera a informação da rota a ser utilizada para transitar do pátio de estocagem até o talhão. Durante o percurso, o tempo de deslocamento calculado a partir da distância de movimentação e da velocidade média do caminhão vazio é considerado.

- **Distância $T \rightarrow P$** : caso se a mensagem recebida pelo agente transportador possua título igual a “Distância $T \rightarrow P$ ”, o agente então recupera a informação da rota a ser utilizada para transitar do talhão ao pátio de estocagem. Durante o percurso, o tempo de deslocamento calculado a partir da distância de transporte e da velocidade média do caminhão carregado é considerado.

- **Qual Volume?**: o agente transportador pode receber uma mensagem de título igual a “Qual volume?” tanto do agente carregador quanto do agente descarregador. Neste caso, o transportador recupera a informação acerca do remetente da mensagem recebida utilizando o comando “*get.sender*” (BELLIFEMINE, 2007) e o encaminha uma mensagem informando a capacidade do veículo. Tal mensagem tem título igual a “Volume”.

- **Caminhão Carregado**: ao receber uma mensagem informando que o caminhão está carregado, o agente transportador envia uma mensagem ao agente roteador, com o título “Aguardo Rota $T \rightarrow P$ ”, informando as coordenadas do pátio de estocagem e do talhão de origem do caminhão e solicitando que o mesmo calcule a melhor rota entre o talhão e o pátio.

- **Caminhão Descarregado**: ao receber uma mensagem informando que o caminhão está descarregado, o agente transportador envia uma mensagem ao agente roteador, com o título “Aguardo Rota $P \rightarrow T$ ”, informando as coordenadas do pátio de estocagem e do talhão de destino do caminhão e solicitando que o mesmo calcule a melhor rota entre o pátio e o talhão.

- **Inativar**: nas situações em que o controlador recalcula os parâmetros do sistema, ele atua diretamente nos outros agentes solicitando que todos interrompam suas ações, para isso ele envia uma mensagem com título “Inativar” para cada agente transportador. Ao receber tal mensagem, o agente transportador é colocado em um estado de espera, o que é realizado pelo

método *doWait()*. O estado de espera é mantido até que uma nova mensagem chegue ao agente, reativando-o.

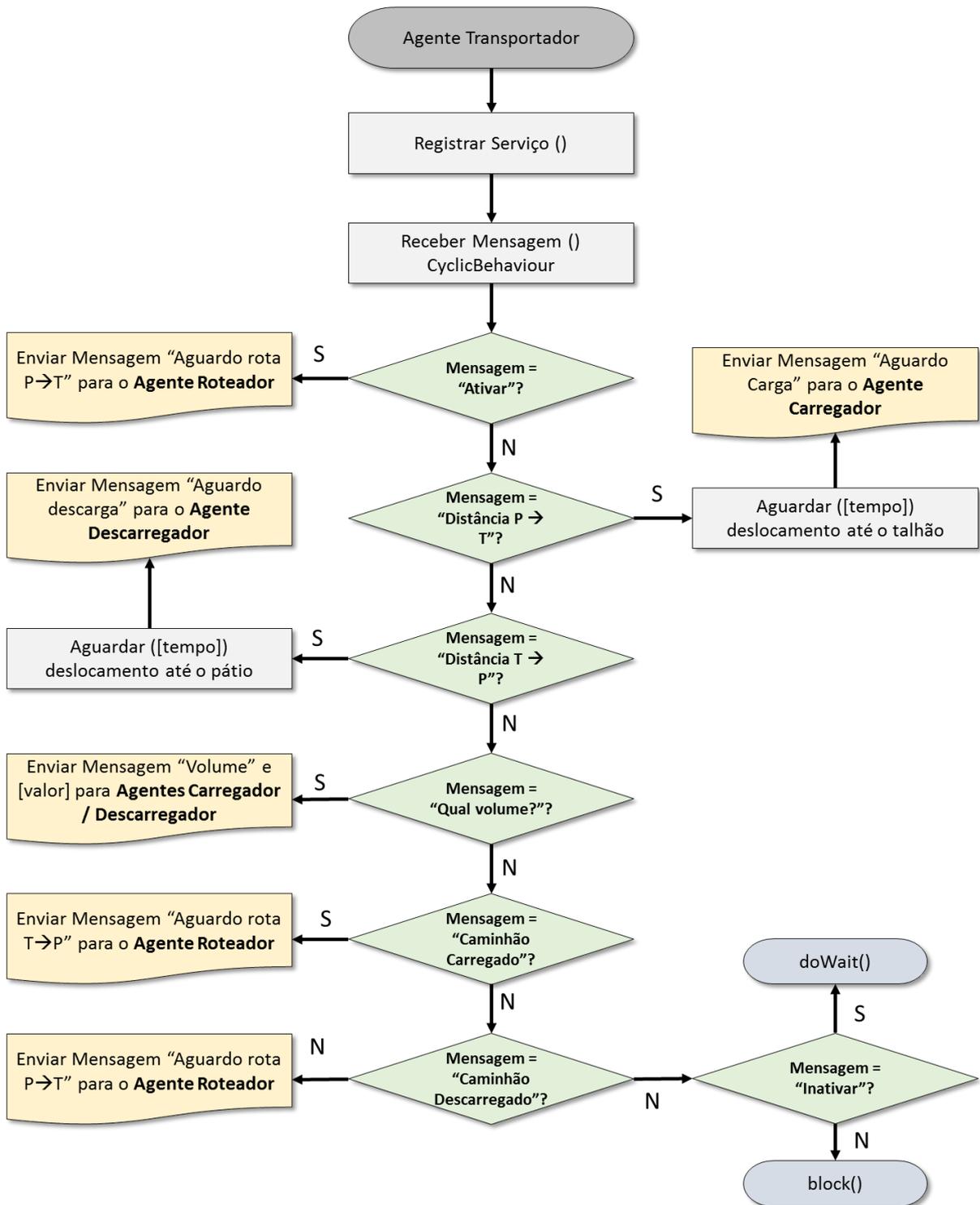


Figura 13 - Fluxograma de recebimento de mensagens, tomada de decisões e envio de mensagens do agente transportador.

O processo de comunicação de cada agente transportador com os demais agentes do sistema, ocorre conforme Figura 14. O agente transportador recebe uma mensagem do agente

controlador, troca informações com o agente roteador e então dirige-se ao agente carregador. Feito isso, ele se comunica novamente com o agente roteador e em seguida com o agente descarregador. Tal processo se desenvolve até que o sistema seja interrompido ou até que todo o volume de madeira disponível seja transportado para o pátio de estocagem.

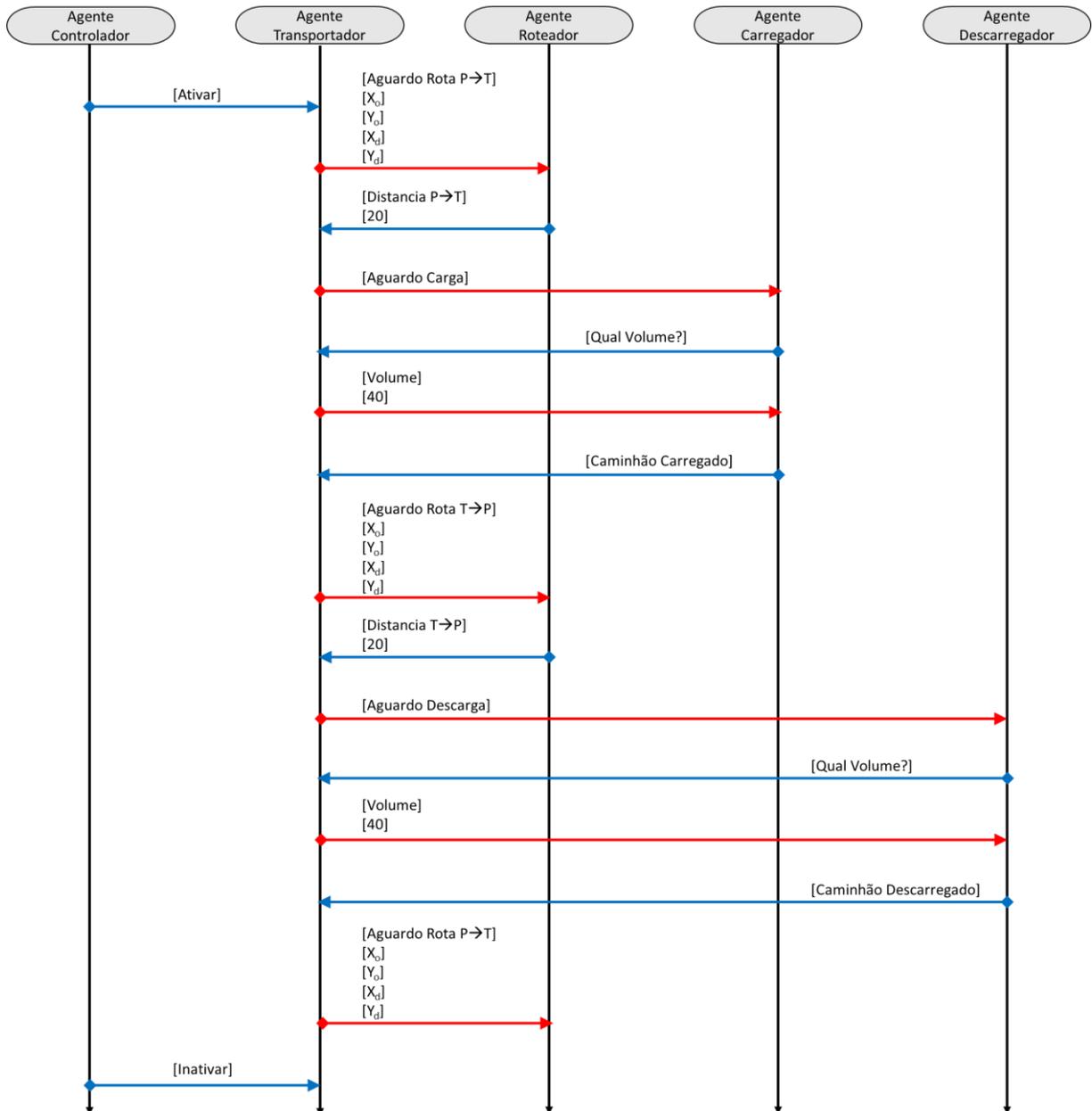


Figura 14 - Resumo do processo de interação do agente transportador com demais agentes do sistema mostrando o fluxo de troca de mensagens.

6.3 Descrição do Agente Carregador

O agente carregador é aquele que representa a máquina (juntamente com o operador) de carregamento dos caminhões, sendo responsável também pelo controle do estoque de madeira

nos talhões. Tal agente tem como atributo o tempo médio de carregamento por unidade de volume (min/m^3) de modo que possa considerar um intervalo de carga em função da quantidade de madeira que será colocada em cada caminhão. Tal atributo é obtido a partir da tabela *Configuracoes* no banco de dados via consulta SQL e pode ser alterado pelo usuário antes que o sistema entre em operação.

Essa possibilidade de modificação de valores de atributos permite que diferentes simulações sejam realizadas considerando distintos tempos de carregamento, o que pode representar a utilização de determinado método de carregamento (manual, mecanizado ou semimecanizado) ou de máquinas com diferentes capacidades operacionais. De fato, o tempo de carregamento exerce significativo impacto no número de ciclos por turno de trabalho, principalmente quando o transporte está sendo realizado a curtas distâncias (MACHADO et al., 2009). Isto mostra a necessidade de ser considerado tal fator na construção do agente citado. Alves et al. (2013) encontraram valores na ordem de 3 a 7% do tempo gasto no ciclo operacional apenas para o carregamento do veículo, destacando sua importância no planejamento operacional.

O agente carregador é iniciado assim que o sistema é estabelecido, registrando seu serviço no sistema e localizando o talhão a partir do qual o transporte será iniciado. Para isso, o agente realiza uma consulta SQL no banco de dados e obtém as coordenadas do primeiro talhão na sequência de transporte a partir da tabela *Planejamento*. Com isso, desloca-se até o talhão e inicia o comportamento de espera por mensagens de outros agentes do sistema. Ao receber uma determinada mensagem, o agente então a verifica o conteúdo da mesma e toma uma ação em função das informações recebidas (Figura 15) e de seu modelo interno de comportamento. As seguintes mensagens que despertam algum tipo de reação do agente transportador são:

- **Aguardo Carga:** ao receber uma mensagem com o título “Aguardo Carga”, o agente carregador solicita então que o remetente informe a capacidade disponível no caminhão para carregamento, enviando-lhe uma mensagem com título “Qual volume?”.

- **Volume:** se o título da mensagem recebida for igual a “Volume”, o agente carregador verifica no corpo da mensagem a informação da capacidade do veículo de transporte. Com base nesta informação e nos dados disponíveis acerca do volume de madeira existente no talhão, o agente carregador avalia se há madeira suficiente para carregar o caminhão. Se sobrar madeira, o agente carregador carrega o caminhão e libera o agente transportador para retornar ao pátio de estocagem enviando-lhe uma mensagem com título “Caminhão Carregado”. Se, ao término

do carregamento, não houver madeira disponível no talhão, o agente carregador envia uma mensagem com título “Talhão Finalizado” ao agente roteador informando que o talhão foi finalizado, de modo que tal talhão não seja mais o destino de outros agentes transportadores.

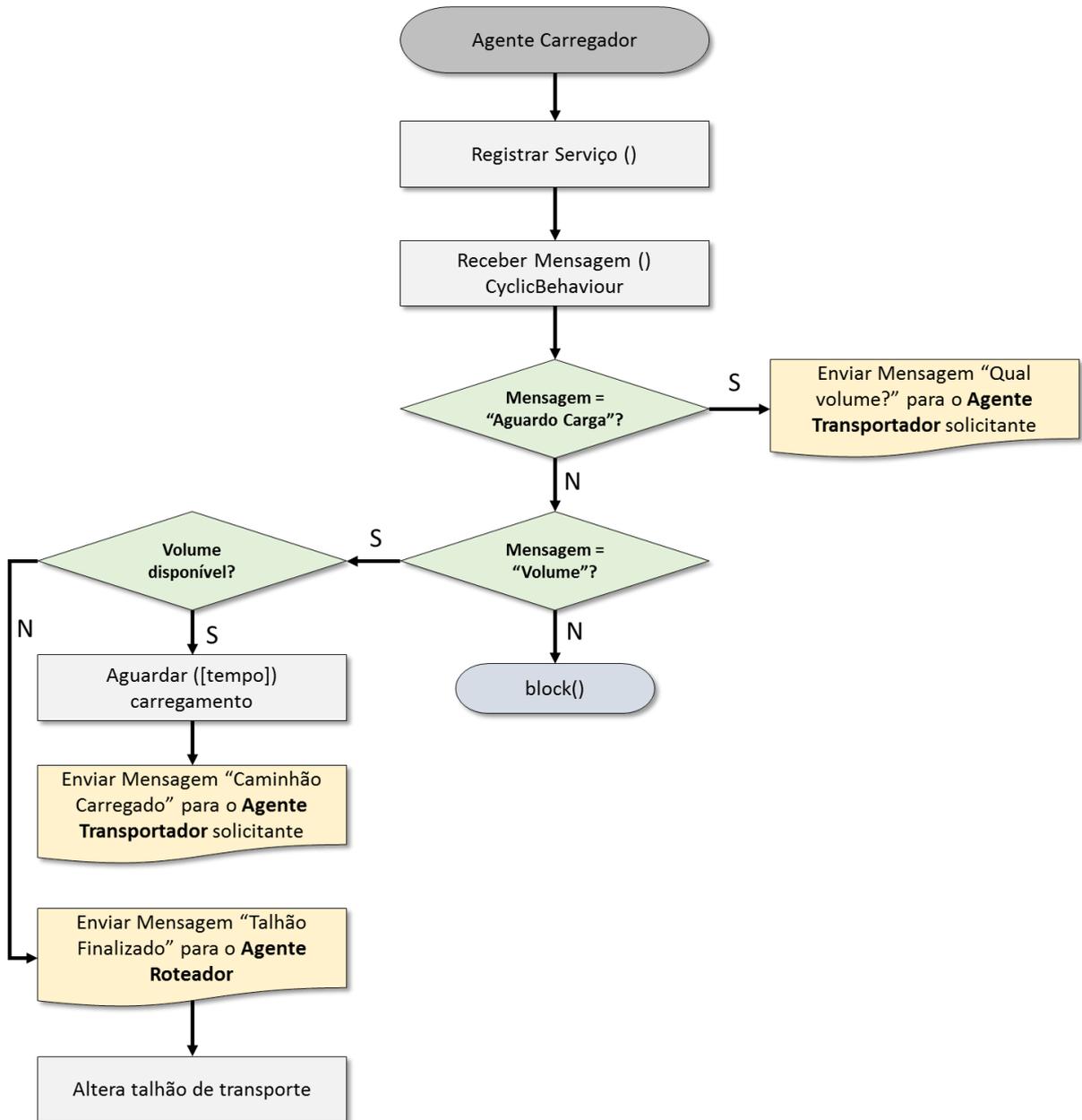


Figura 15 - Fluxograma de recebimento de mensagens, tomada de decisões e envio de mensagens do agente carregador.

A comunicação do agente carregador é feita com os agentes transportador e roteador (Figura 16). Com o agente transportador, a troca de mensagens está relacionada com a operação de carregamento do caminhão. Já com o roteador, a única mensagem enviada ocorre em função da finalização do talhão cujo volume de madeira já se esgotou.

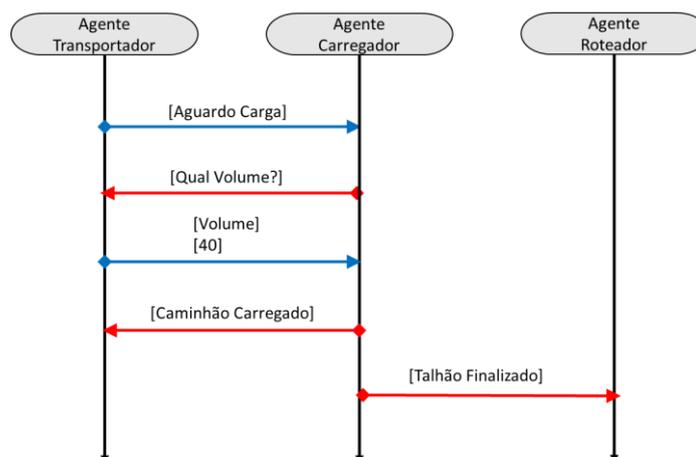


Figura 16 - Resumo do processo de interação do agente carregador com demais agentes do sistema mostrando o fluxo de troca de mensagens.

6.4 Descrição do Agente Descarregador

O agente descarregador representa a máquina (juntamente com o operador) de descarregamento dos caminhões no pátio de estocagem. Tal agente é iniciado assim que o sistema é estabelecido e tem como única finalidade o recebimento da madeira dos caminhões.

O agente descarregador tem como atributo o tempo médio de descarregamento por unidade de volume (min/m^3), informação que o mesmo utiliza para calcular o tempo pelo qual ele executará a retirada da madeira do caminhão, e liberando-o para uma nova tarefa de transporte. Assim como o agente carregador, o agente descarregador determina tal tempo em função da quantidade de madeira que será descarregada em cada tipo de caminhão. Esse atributo é obtido a partir da tabela *Configuracoes* no banco de dados via consulta SQL.

As considerações acerca da necessidade de se incluir o atributo tempo de descarregamento na modelagem de tal agente são como aquelas feitas em relação ao tempo de carregamento, seguindo o que é mencionado por Machado et al. (2009) em relação a importância de tais atividades no ciclo operacional do transporte florestal.

Com isso, o agente descarregador registra seu serviço no sistema e inicia o comportamento de espera por mensagens de outros agentes. Ao receber uma determinada mensagem, o agente então a verifica o conteúdo da mesma e toma uma ação em função das informações recebidas e de sua configuração interna (Figura 17). As seguintes mensagens que despertam algum tipo de reação do agente transportador são:

- **Aguardo Descarga:** ao receber uma mensagem com o título “Aguardo Descarga”, o agente descarregador solicita então que o remetente informe a quantidade de madeira disponível no caminhão para descarregamento, enviando-lhe uma mensagem com título “Qual volume?”.

- **Volume:** se o agente descarregador receber uma mensagem com título igual a “Volume”, ele verifica no corpo da mensagem a informação da quantidade de madeira disponível no veículo de transporte. Assim, ele realiza o descarregamento do caminhão e o libera para um novo ciclo de transporte, enviando-lhe uma mensagem com título igual a “Caminhão Descarregado”.

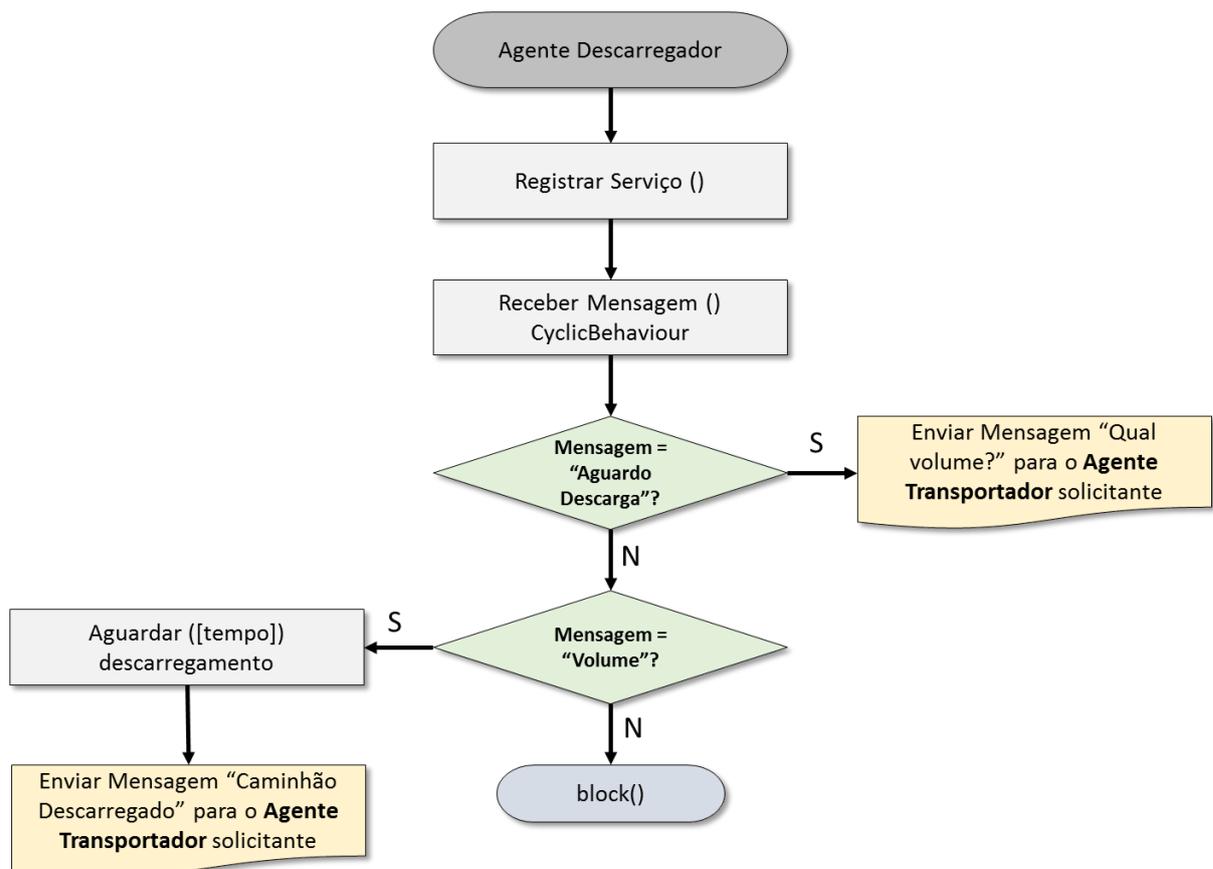


Figura 17 - Fluxograma de recebimento de mensagens, tomada de decisões e envio de mensagens do agente descarregador.

A comunicação do agente descarregador é restrita ao agente transportador e está relacionada ao processo de descarregamento da madeira no pátio de estocagem (Figura 18).

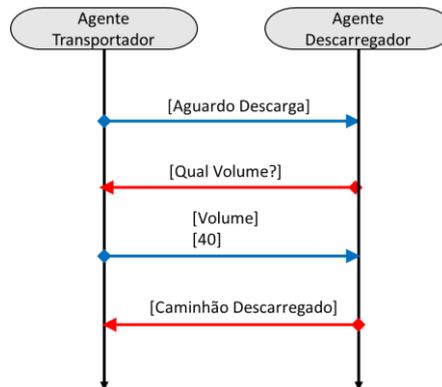


Figura 18 - Resumo do processo de interação do agente descarregador com demais agentes do sistema mostrando o fluxo de troca de mensagens.

6.5 Descrição do Agente Controlador

O agente controlador é aquele responsável por realizar os cálculos que buscam a otimização do processo e por acompanhar o processamento dos demais agentes do sistema. Assim, é ele quem decide quando iniciar, pausar ou reiniciar cada agente, considerando a evolução do ambiente e a busca pela melhor alternativa a ser aplicada ao planejamento do transporte florestal.

Ao ser inserido no sistema, o agente controlador inicia o processamento do transporte florestal solicitando que o agente roteador calcule as melhores rotas iniciais entre cada talhão e o pátio de estocagem.

Dependendo de como o ambiente evolui, o agente controlador decide por tomar uma ou outra ação, principalmente em função das mensagens que ele recebe dos demais agentes (Figura 19 e Figura 20). As mensagens que despertam algum tipo de reação do agente controlador são:

- **Iniciar**: ao receber uma mensagem cujo título seja igual a “Iniciar”, o agente controlador entende que o sistema está preparado para iniciar o transporte de madeira. Assim, tal agente executa rotinas de elaboração de um modelo de programação linear inteira a partir dos dados disponíveis no banco de dados, de modo a obter um dimensionamento de frota que minimize os custos totais do transporte de madeira. Esse processo é realizado pelos métodos “Organizar PL ()”, “Gerar PL ()” e “Resolver PL ()”, os quais utilizam as funções implementadas na biblioteca LPSolve. O modelo matemático de PLI que melhor se adequou ao problema em questão foi:

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^n C_j X_j \tag{8}$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n X_j V_j = D \quad (9)$$

$$X_j \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$X_j \in Z^+ \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (11)$$

em que:

- X_j : representa a quantidade de caminhões do tipo j que deve ser inserida no sistema;
- V_j : é o volume transportado no período de uma hora (m^3/h) para cada caminhão do tipo j ;

- D : a demanda horária de madeira pelo pátio de estocagem (m^3/h).

- C_j : é o coeficiente que representa o custo da atividade de transporte ocorrida no período de uma hora (R\$/h) para cada caminhão do tipo j , sendo calculado por:

$$C_j = c_j V_j d_m \quad (12)$$

em que:

- c_j : custo médio de transporte da madeira para o caminhão do j -ésimo tipo, sendo dado em R\$/ $m^3 km$;

- d_m : distância média de transporte (km);

- V_j : quantidade de madeira que um caminhão do tipo j transporta em uma hora (m^3/h), o qual é dado por:

$$V_j = N_j Cap_j \quad (13)$$

em que:

- Cap_j : capacidade de carga do caminhão do tipo j (m^3);

- N_j : quantidade de viagens que um caminhão do j -ésimo tipo consegue realizar em uma hora, sendo:

$$N_j = \left[\frac{2d_m}{vel_{mj}} + Cap_j \left(\frac{t_c + t_d}{60} \right) \right]^{-1} \quad (14)$$

em que:

- t_c e t_d : tempo médio de carregamento e descarregamento, respectivamente (minutos/ m^3);

- vel_{mj} : velocidade média do veículo do tipo j (km/h).

Após os cálculos, o agente controlador insere os novos agentes transportadores no sistema utilizando o método “Atualizar Frota ()” e então envia uma mensagem a cada um deles com título igual a “Ativar”, de modo que o transporte de madeira seja iniciado.

A otimização da frota de veículos é importante para que as vantagens de utilização de tal modal de transporte sejam alcançadas. O modelo de otimização criado considera a distância

de transporte, a demanda de madeira e a capacidade de carga dos veículos, além dos custos operacionais. Tais fatores são citados por Alves et al. (2013), onde os autores ainda destacam que a escolha dentre os diferentes tipos de veículos e rotas pode se tornar um problema quando não ocorre de maneira adequada.

A abordagem na qual um SMA é modelado considerando a utilização de uma ferramenta de otimização pode ser feita conforme Filho e Ribeiro (2014) e de Bohnlein et al. (2011). Os dois primeiros autores propuseram uma solução híbrida composta por sistema multiagente e metaheurística GRASP, para solução de um problema de escalonamento de veículos em transporte público, determinando a quantidade de veículos necessários para realização da atividade. Já no segundo trabalho mencionado, os autores utilizam a metaheurística *Ant Colony Optimization* para computar planos de rotas válidos para os agentes que representam veículos de transporte.

- **Reiniciar:** ao receber uma mensagem cujo título seja igual a “Reiniciar”, o agente controlador entende que há alguma indicação de interrupção permanente de um trecho da malha viária do ambiente. Dessa maneira, ele suspende todos os agentes do sistema e então invoca o método “Reiniciar ()” com o parâmetro “Permanente”. Tal método é responsável por enviar uma mensagem ao agente roteador solicitando que haja uma revisão dos valores das distâncias de transporte de cada talhão até o pátio. Feito isso, o agente controlador aguarda uma mensagem do agente roteador com título “Iniciar” para que o redimensionamento da frota de caminhões seja feito.

- **Calcular Alternativas:** o recebimento de uma mensagem com título “Calcular Alternativas” indica para o agente controlador que houve alguma interrupção temporária em um trecho das estradas no ambiente. Com isso, ele executa uma série de rotinas para tomar uma decisão frente ao problema informado, o que, neste caso, consiste em avaliar duas alternativas: manter a sequência atual de transporte utilizando uma rota mais longa ou alterar a frente de transporte para outro talhão. A alternativa que apresentar menor custo é a escolhida.

Antes de realizar tais cálculos, o agente controlador precisa conhecer a distância que deve ser percorrida por um “caminhão prancha” durante a movimentação da máquina de carregamento de um talhão para outro. Dessa maneira, tal agente envia uma mensagem ao agente roteador solicitando a distância entre o pátio e o talhão no qual a máquina de carga se encontra (“Aguardo Rota $P \rightarrow T$ ”).

- **Distância $P \rightarrow T$:** ao receber uma mensagem do agente roteador com título de “Distância $P \rightarrow T$ ”, o agente controlador armazena a informação e então enviar uma nova

mensagem ao agente roteador solicitando a rota entre o talhão de destino da máquina de carregamento e o pátio de estocagem (“Aguardo Rota T→P”).

- **Distância T→P:** uma vez recebida a informação sobre a distância entre o talhão de destino da máquina de carregamento e o pátio, o agente controlador calcula a distância entre o talhão de origem e o talhão de destino de tal máquina. Assim, ele tem todas as informações disponíveis para escolher entre as duas alternativas para contornar o problema da interrupção temporária da rota de transporte.

O custo relativo à primeira alternativa é calculado considerando o volume de madeira que será transportado pela rota mais longa. Para isso, o agente controlador calcula o volume de madeira correspondente, com base no tempo informado para a permanência da restrição. Assim, é possível calcular o custo de transporte passando por uma rota mais longa. A formulação matemática é:

$$CR = \sum_i^m c_{mp} d_{i\ cr} V_{i\ cr} - \sum_i^m c_{mp} d_{i\ sr} V_{i\ sr} \quad (15)$$

$$c_{mp} = \sum_{j=1}^n c_j V_j Q_j / \sum_{j=1}^n V_j Q_j \quad (16)$$

em que:

- CR: custo total de alteração da rota de transporte (R\$);
- c_{mp} : custo médio ponderado para o transporte da madeira (R\$/m³km);
- $d_{i\ cr}$: distância do talhão i, considerando restrição de rota, até o pátio (km);
- $V_{i\ cr}$: volume transportado do talhão i até o pátio, considerando a restrição de rota (m³);
- $d_{i\ sr}$: distância do talhão i, sem a restrição de rota, até o pátio (km);
- $V_{i\ sr}$: volume transportado do talhão i até o pátio, sem a restrição de rota (m³);
- c_j : custo para o transporte de madeira para o j-ésimo tipo de caminhão (R\$/m³km);
- V_j : volume transportado por hora para o j-ésimo tipo de caminhão (m³/h);
- Q_j : quantidade de caminhões do tipo j.

Para a segunda alternativa, o agente controlador precisa identificar quais talhões não serão transportados enquanto a restrição temporária persistir. Assim, ele utiliza um modelo de programação linear inteira binária para maximizar a quantidade de madeira transportada, mantendo a distância média de transporte inalterada. O modelo matemático é:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^m V_i X_i \quad (17)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m (d_{i\ cr} - d_{i\ sr}) X_i = 0 \quad (18)$$

$$X_i \in \{0, 1\} \forall i = 1, \dots, m \quad (19)$$

em que:

- V_i : volume atualmente disponível no i -ésimo talhão (m^3);
- X_i : variável de decisão que indica se o talhão será transportado ($X_i = 1$) ou será bloqueado ($X_i = 0$);
- $d_{i\ cr}$: distância do talhão i ao pátio considerando a restrição de rota (km);
- $d_{m\ cr}$: distância média de transporte sem considerar a restrição de rota (km);

Uma vez definidos os talhões que não serão transportados no momento, o agente controlador calcula o custo de se alterar a frente de transporte para outro talhão. Para isso, ele precisa das informações repassadas pelo agente roteador (“Distância $P \rightarrow T$ ” e “Distância $T \rightarrow P$ ”) para obter a distância a ser percorrida pelo veículo de movimentação da máquina de carregamento (caminhão prancha). Assim, o custo de movimentação da máquina de carregamento será igual a:

$$CF = 2(d_{pt} + d_{tt} + d_{tp})C_v + C_f \quad (20)$$

em que:

- CF : custo total para alterar a frente de transporte (R\$);
- d_{pt} : distância entre o pátio e o talhão onde a máquina de carregamento se encontra (km);
- d_{tp} : distância entre o talhão de destino da máquina de carregamento e o pátio (km);
- d_{tt} : distância entre os talhões de origem e de destino da máquina de carregamento (km);
- C_v : custo variável de locação do caminhão prancha (R\$/km);
- C_f : custo fixo de locação do caminhão prancha (R\$).

Com os valores de CF e CR , o agente controlador então decide entre as duas alternativas, escolhendo a que oferecer um menor custo de execução. Como os agentes transportadores foram suspensos para que o agente controlador pudesse decidir sobre a melhor alternativa, ao tomar sua decisão final, tal agente então envia uma mensagem a cada agente transportador com título “Ativar” para que eles retomem as atividades de transporte de madeira. Ainda, o agente controlador ativa um processamento paralelo para acompanhamento da restrição imposta. Tal processamento ocorre pelo tempo determinado, eliminando a restrição ao seu término por meio do envio de uma mensagem ao agente roteador (“Eliminar Restrição”) para que ele retire a restrição do mapa.

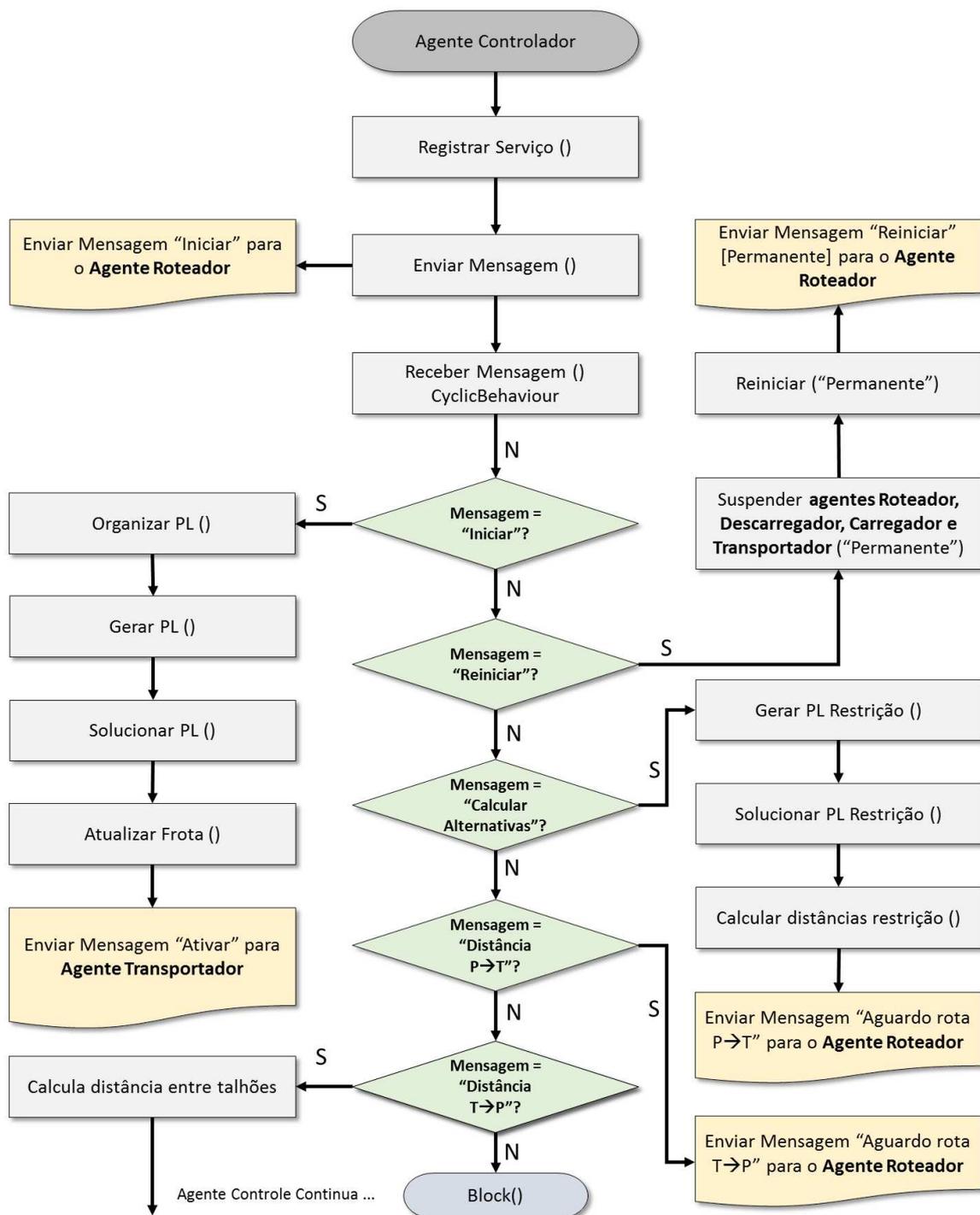


Figura 19 - Fluxograma de recebimento de mensagens, tomada de decisões e envio de mensagens do agente controlador.

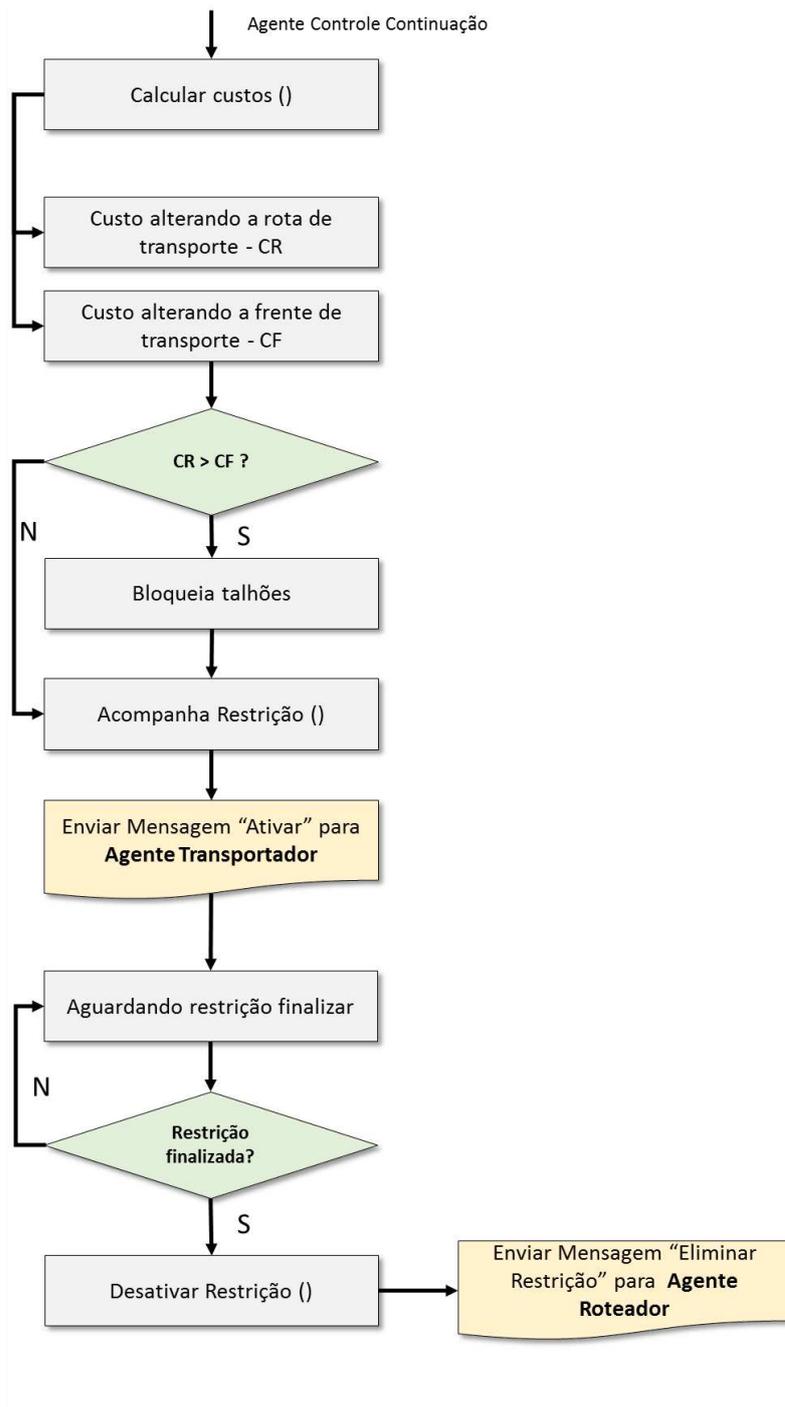


Figura 19 - Fluxograma de recebimento de mensagens, tomada de decisões e envio de mensagens do agente controlador (continuação).

A troca de mensagens entre o agente controlador e outros agentes do sistema pode ser observada na Figura 20. Inicialmente, o agente controlador se comunica com o agente roteador para iniciar o sistema e então envia mensagem aos agentes transportadores para que o transporte seja iniciado. Quando o agente roteador detecta alguma alteração nas rotas, ele entra em contato com o agente controlador para que o sistema seja rearranjado. O agente controlador então envia uma mensagem aos agentes transportadores solicitando que as atividades sejam

momentaneamente interrompidas para que ele possa, em conjunto com o agente roteador, estabelecer uma nova configuração para o sistema. Ao final do processo, o agente controlador então realiza comunicação com os agentes transportadores liberando-os para continuar o transporte da madeira. Isso ocorre tanto para uma restrição permanente de rotas quanto para uma restrição temporária.

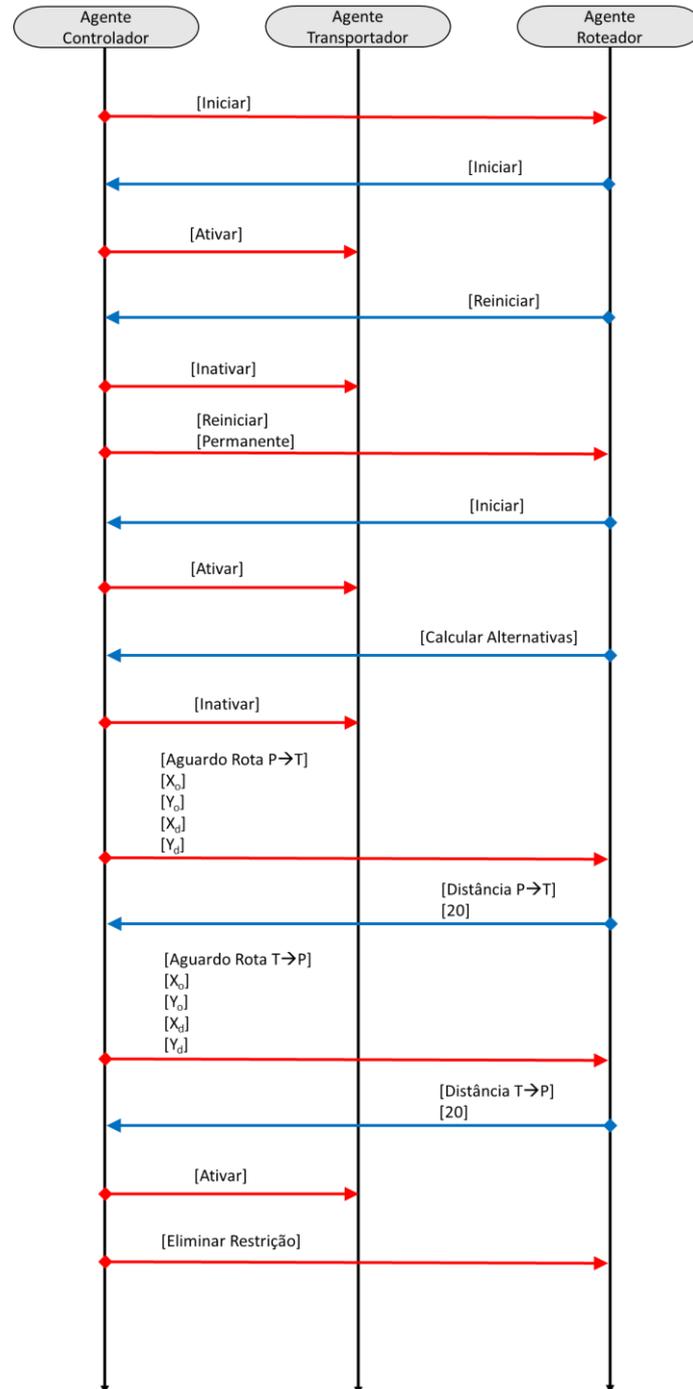


Figura 20 - Resumo do processo de interação do agente controlador com demais agentes do sistema mostrando o fluxo de troca de mensagens.

6.6 Descrição do Agente Roteador

O agente roteador é configurado para realizar os cálculos das melhores rotas entre o pátio de estocagem e cada talhão do ambiente. Ao iniciar, ele atualiza a tabela de distâncias considerando a situação atual das estradas florestais e, quando ocorre alguma interrupção em um trecho da malha viária, o agente roteador informa o ocorrido ao agente controlador para que este tome as devidas providências.

As mensagens que despertam algum tipo de reação do agente transportador são (Figura 21):

- **Iniciar**: ao receber a mensagem “Iniciar”, do agente controlador, o agente roteador inicia o ambiente de atuação dos agentes, por meio do carregamento do mapa contendo talhões, estradas e pátio de estocagem. Assim que essa ação termina, o agente roteador verifica todas as distâncias entre cada talhão e o pátio e publica tal informação no banco de dados, na tabela PLANEJAMENTO. Ao finalizar sua ação, ele envia uma mensagem ao agente controlador com título igual a “Iniciar”, informando que a otimização inicial da frota de veículos pode ser realizada.

- **Aguardo Rota P→T**: recebendo uma mensagem cujo título seja igual a “Aguardo Rota P→T”, o agente roteador verifica o conteúdo da mensagem para obter as coordenadas que serão utilizadas para calcular a melhor rota entre o pátio e o talhão informado. Para calcular a distância, o agente utiliza o comando `doRouting()`, disponível na biblioteca do ArcGis Runtime. Para o cálculo, ele considera as possíveis interrupções de trechos que possam existir no ambiente. Ao terminar sua tarefa, o agente roteador retorna uma mensagem ao remetente da solicitação informando que rota entre o pátio e o talhão foi determinada. Tal mensagem tem título igual a “Distancia P→T” e o conteúdo possui a distância calculada.

- **Aguardo Rota T→P**: ao receber uma mensagem do tipo “Aguardo Rota T→P”, o agente realiza o mesmo raciocínio descrito para o recebimento da mensagem anterior (“Aguardo Rota P→T”), com diferença apenas na inversão da direção da rota.

- **Reiniciar**: uma mensagem do tipo “Reiniciar” significa para o agente roteador que o agente transportador aguarda por uma atualização de todas as rotas entre os talhões e o pátio de estocagem. A ação do agente roteador dependerá então do tipo de restrição que se está trabalhando e essa informação lhe é repassada pela mesma mensagem, ao longo do corpo do texto. Caso a restrição seja do tipo “Permanente”, o roteador recalcula as rotas e atualiza a coluna “Distancia2” da tabela *Planejamento* e então envia a mensagem “Iniciar” para o agente

controlador que irá recalcular a quantidade de agentes transportadores ideal para a sequência da operação. Se a restrição for do tipo “Temporária”, o agente roteador recalcula as rotas preenchendo a coluna “Distancia3” da tabela *Planejamento* e em seguida envia a mensagem “Calcular Alternativas” para o agente controlador, de modo que este verifique se o sistema deve alterar a frente de transporte ou utilizar uma rota alternativa para escoar a madeira.

- **Eliminar Restrição:** a mensagem “Eliminar Restrição” indica para o agente roteador que uma das restrições de rota (interrupção de um trecho da malha viária) deve ser retirada do sistema. Assim, o agente verifica o conteúdo da mensagem para obter o código identificador da restrição e então realizar uma consulta SQL à tabela RESTRICOES do banco de dados para obter os parâmetros de tal restrição. A partir disso, o agente roteador elimina a restrição do mapa (método Elimina Barreira()) e dos cálculos das rotas entre talhões e pátio. Ao eliminar uma barreira, o agente verifica se existe alguma outra restrição ativa, caso contrário ele atualiza a tabela *Planejamento*, desbloqueando todos os talhões para o transporte, o que resulta na retomada da sequência inicial de transporte de madeira.

- **Talhão Finalizado:** uma mensagem cujo título seja “Talhão Finalizado” faz com que o agente roteador insira no mapa uma identificação para o talhão cuja madeira já foi totalmente transportada.

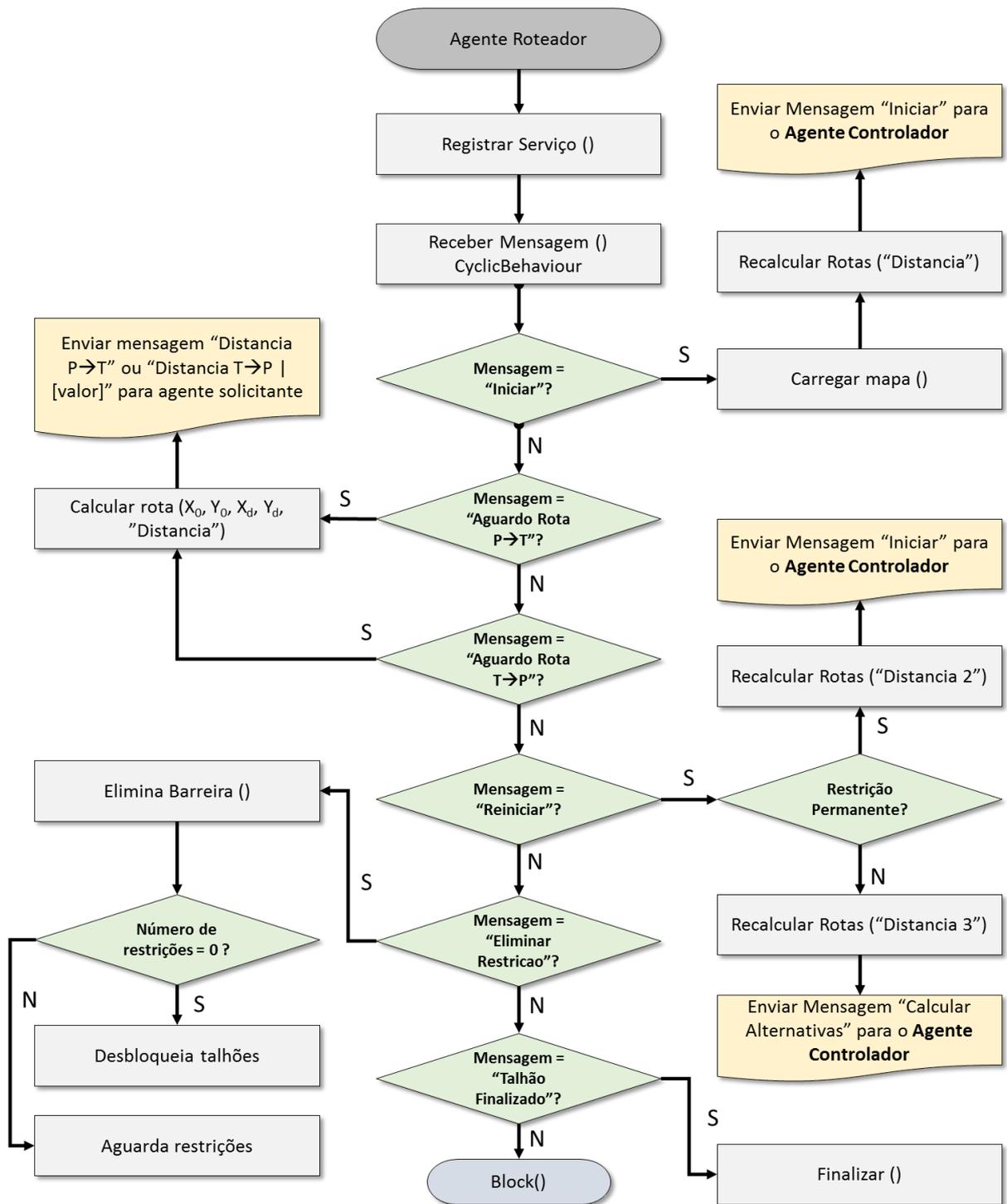


Figura 21 - Fluxograma de recebimento de mensagens, tomada de decisões e envio de mensagens do agente roteador.

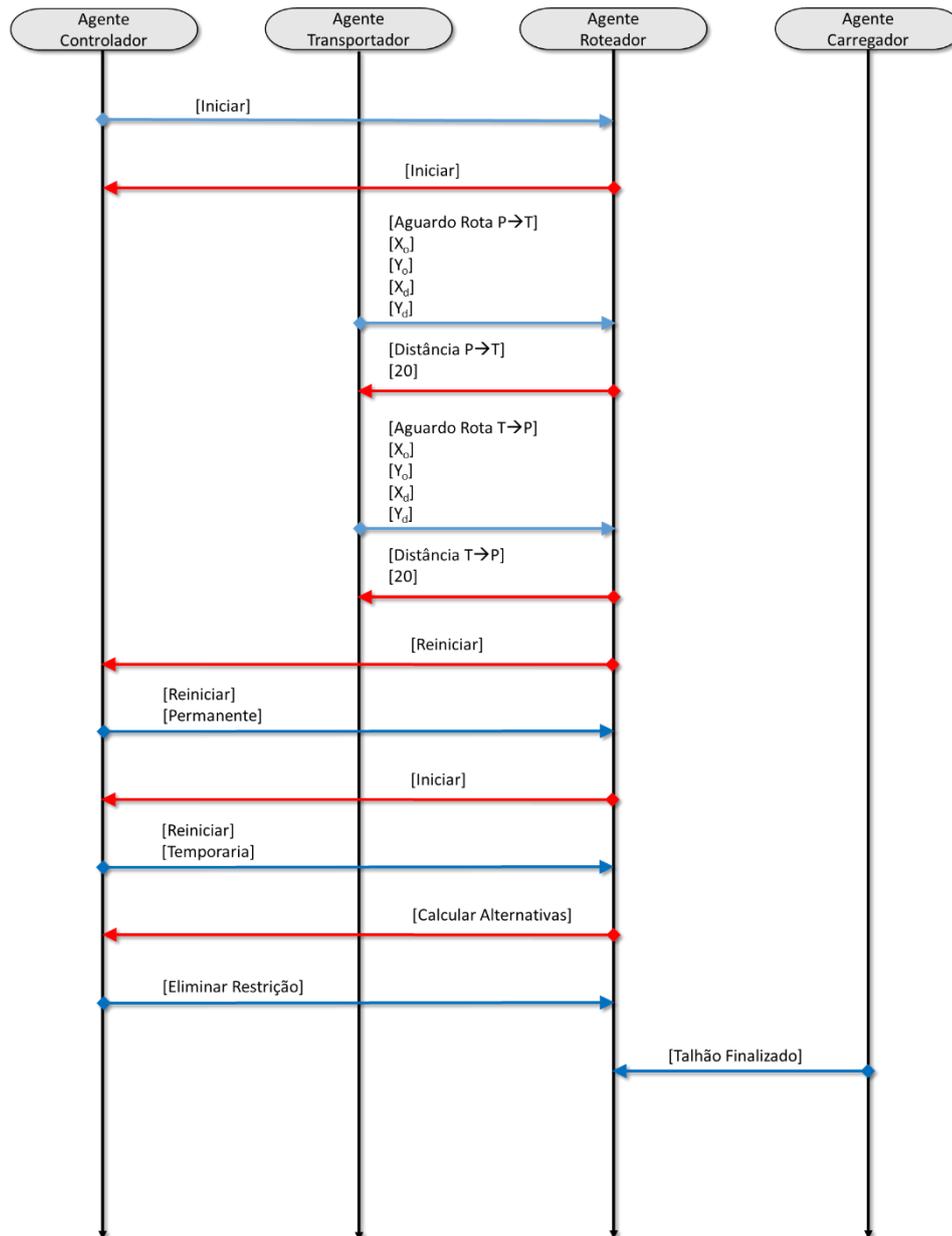


Figura 22 - Resumo do processo de interação do agente roteador com demais agentes do sistema mostrando o fluxo de troca de mensagens.

O agente roteador calcula a rota que oferece o menor valor de distância entre talhão e pátio de estocagem. No entanto, dependendo da configuração do *network dataset* utilizado pelo SMA, o agente roteador poderá determinar como melhor caminho aquele que retorne o menor tempo de viagem (LIMA, 2009) ou o menor consumo de combustível (JOVICIC et al., 2010), o que demonstra a flexibilidade do modelo construído.

De acordo com Machado et al. (2009), a distância de transporte é um dos fatores que mais afetam os custos da atividade. Em virtude disso, o agente roteador desempenha papel fundamental em um sistema cujo foco seja um planejamento otimizado do transporte florestal.

6.7 Configuração do Sistema

O sistema multiagente foi desenvolvido com o intuito de permitir que o usuário possa avaliar diferentes cenários a partir da alteração dos parâmetros do modelo e da área florestal considerada.

A demanda de madeira pode ser alterada na tela inicial do sistema (Figura 23a). Ela é de extrema importância para estimar a quantidade de caminhões que o sistema utilizará para o transporte da madeira. Os valores para o tempo de carregamento e descarregamento, em minutos.m³⁻¹, podem ser modificados dependendo do maquinário que se deseja simular.

A área florestal que contém a madeira que será transportada dos talhões para o pátio pode ser determinada pela importação de diferentes arquivos de *geodatabase*, *network dataset* e *map tile package* (Figura 23b). Já a localização do pátio de estocagem no mapa importado para o sistema pode ser modificada por meio da alteração dos valores das coordenadas do mesmo (Figura 23c). O usuário tem liberdade a configuração do ambiente no qual os agentes irão atuar.

Já com relação aos tipos de caminhões disponíveis, para que haja inclusão de uma nova categoria, o usuário deve utilizar o gerenciador de banco de dados, o qual pode ser acessado pelo botão “Banco de Dados” da tela inicial (Figura 23a). Com comandos SQL é possível incluir novos tipos de caminhões, eliminar outros e modificar os parâmetros dos mesmos. Uma vez definidos os tipos de caminhões, bem como suas parametrizações, pode-se optar por utilizar ou não determinado tipo de caminhão no processo de otimização do dimensionamento da frota. Basta selecionar a linha correspondente ao tipo de caminhão na tabela da Figura 23d e clicar no botão “Excluir seleção” para que o tipo selecionado não seja considerado. Para considerar uma determinada categoria, esta deve ser selecionada no *listbox*, em seguida basta clicar em “Selecionar” (Figura 23d).

Após configurado o sistema, o usuário deve confirmar os parâmetros inseridos, clicando no botão “Confirmar” da tela inicial (Figura 23a). Com isso o botão “Iniciar Máquinas” torna-se habilitado para acionamento. Tal botão libera o sistema para iniciar a simulação inserindo os agentes no ambiente configurado.

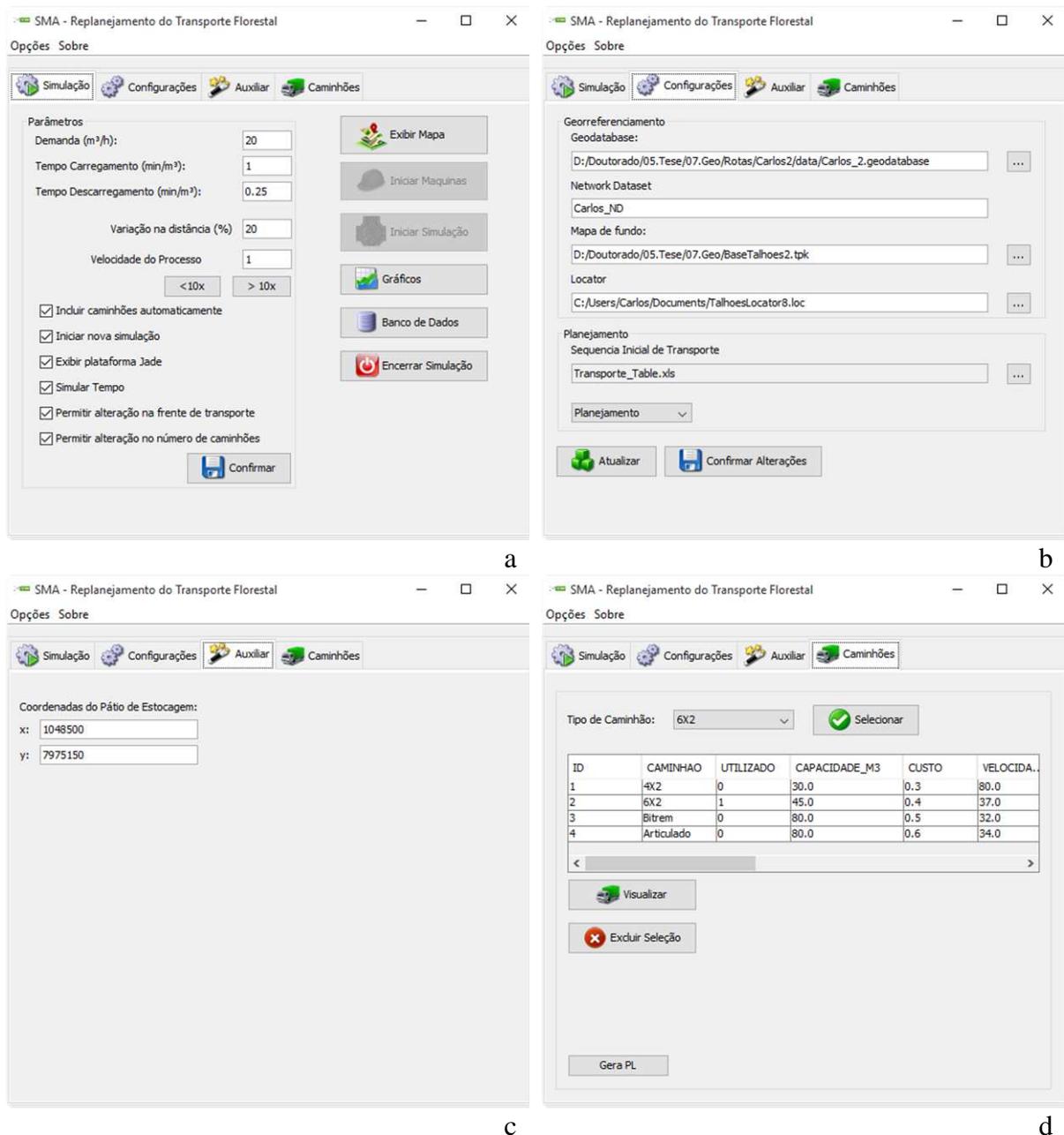


Figura 23 - Tela inicial do sistema multiagente (a), tela de definição do mapa a ser importado (b), tela para identificação do local do pátio de estocagem (c) e tela para escolha dos tipos de caminhões considerados no sistema (d).

6.8 Saídas e Acompanhamento do Sistema Multiagente

Um conjunto de gráficos foi elaborado para permitir o acompanhamento do processamento do transporte de madeira à medida em que o sistema multiagente realiza os procedimentos modelados. Assim, em função da evolução do sistema, em termos da execução das atividades de transporte florestal, os gráficos são atualizados instantaneamente fornecendo

ao usuário uma dimensão temporal acerca do comportamento dos agentes e da solução dos problemas simulados. Alguns dos gráficos construídos são:

- **Volume transportado (m^3):** volume de madeira já transportado para cada talhão no ambiente (Figura 24a);

- **Volume transportado por caminhão (m^3):** mostra a quantidade de madeira que cada agente transportador movimentou dos talhões para o pátio de estocagem (Figura 24b);

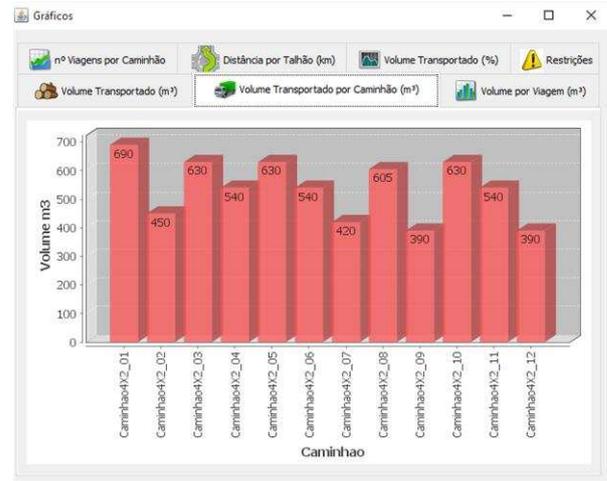
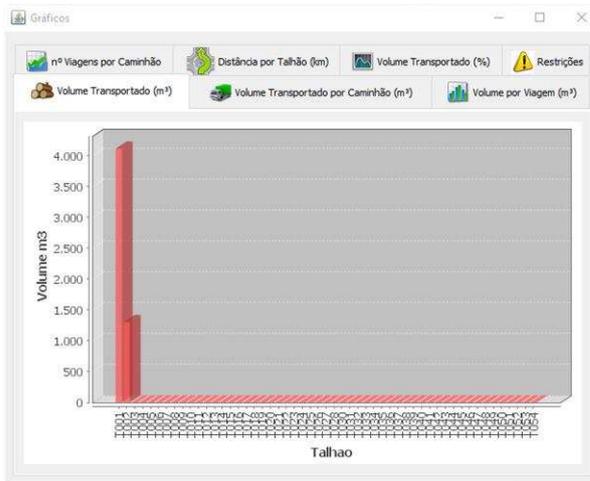
- **Nº de viagens por caminhão:** mostra a quantidade de vezes que um caminhão transportou madeira dos talhões para o pátio de estocagem (Figura 24c).

- **Distância por talhão (km):** distância de transporte entre talhões e pátio de estocagem (Figura 24d). Neste caso podem ser mostradas até três diferentes distâncias: distância sem nenhuma restrição de rota (linha azul), distância com restrição temporária de rota (linha verde) e distâncias com alguma restrição permanente na malha viária (linha vermelha).

- **Restrições:** permite o acompanhamento das restrições temporárias inseridas no sistema (Figura 24e).

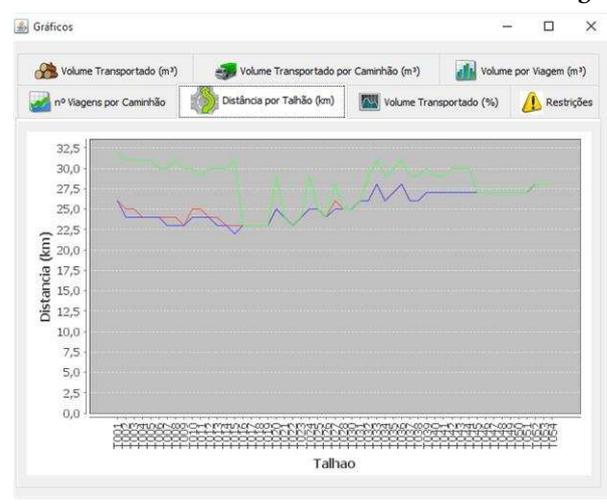
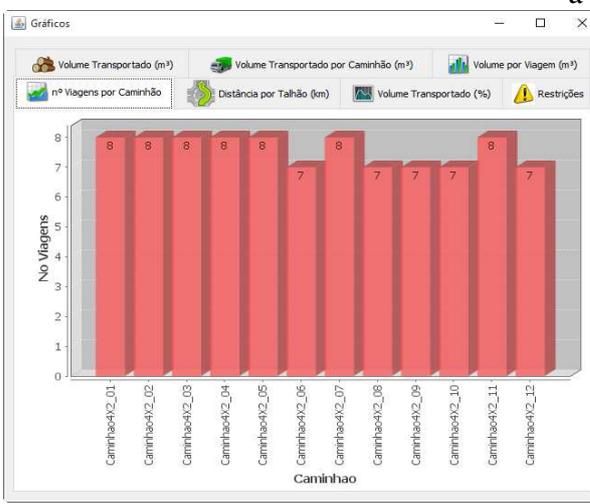
- **Volume transportado (%):** percentual de volume de madeira já transportado para cada talhão do ambiente (Figura 24f);

- **Volume de madeira por viagem (m^3):** mostra a quantidade de madeira que chega no pátio de estocagem considerando as últimas 100 viagens realizadas. Permite o acompanhamento das entregas.



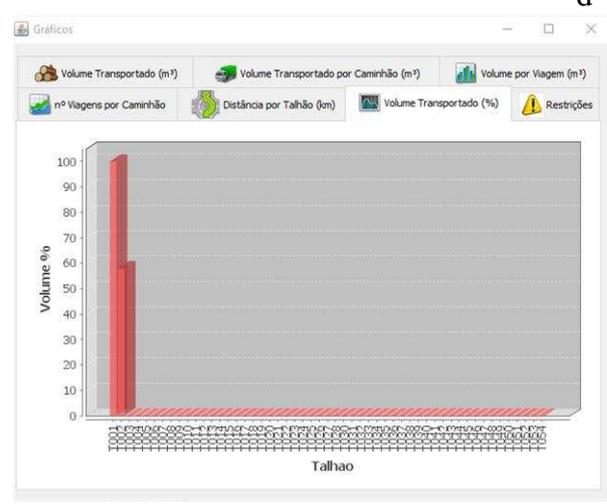
a

b



c

d



e

f

Figura 24 - Gráficos de acompanhamento do SMA. Volume transportado por talhão (a). Volume transportado por veículo (b). Número de viagens feitas por veículo (c). Distância entre talhões e pátio de estocagem sem interrupção de rota (linha azul), com interrupção temporária (linha verde) e com interrupção permanente (linha vermelha) (d). Restrições de rota (e). Percentual de volume transportado por talhão (f).

Além das saídas gráficas, o usuário pode acessar o gerenciador de banco de dados e exportar para planilhas eletrônicas os dados contidos nas tabelas, de modo que novas análises possam ser realizadas. Para isso basta acessar a tela “Visualizar dados”, escolher a tabela que será exportada ou realizar uma consulta SQL informando os dados que devem ser mostrados e então clicar no botão “Exportar Resultado” (Figura 25).

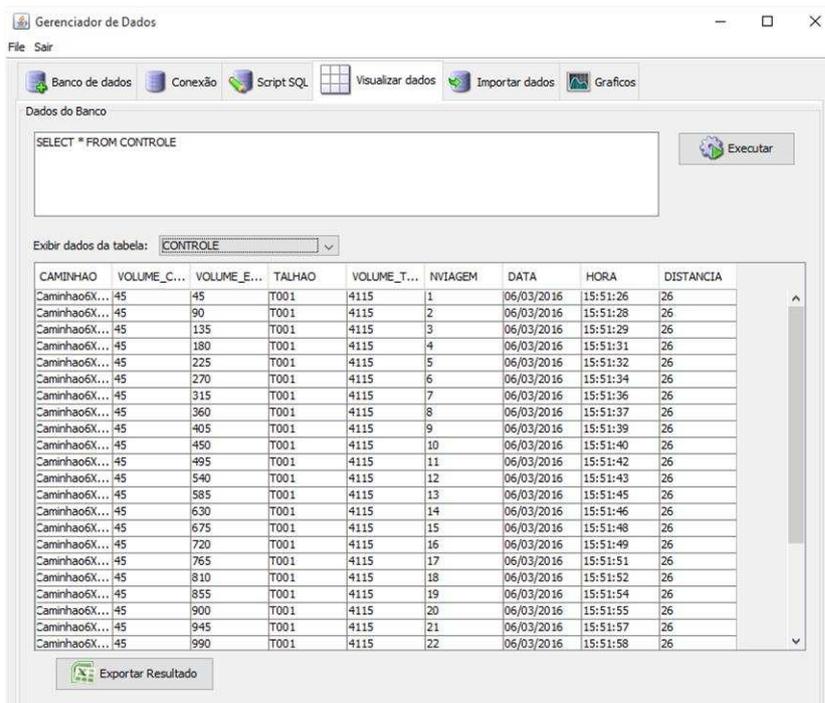


Figura 25 - Tela de saída do gerenciador de banco de dados mostrando a tabela *Controle*.

Para que houvesse uma possibilidade de interação entre usuário e sistema, uma interface gráfica georreferenciada foi elaborada (Figura 26). Tal interface permite a visualização da localização dos agentes no sistema, identificando os locais onde ocorre carregamento e descarregamento de madeira, as rotas utilizadas e os talhões cujo transporte já foi finalizado. É possível verificar os locais onde as restrições de rotas foram inseridas, distinguindo-as entre interrupções temporárias e permanentes.

As interrupções de rotas estão relacionadas com a existência de defeitos nas estradas ou ocorrência de eventos que não dependem da qualidade das mesmas, como chuvas de maior intensidade, deslizamento de barreiras, quedas de árvores ou de pontes. Em trabalho sobre métodos de avaliação da qualidade de estradas, Oliveira et al. (2013) encontraram problemas graves em 25% dos pontos amostrados, o que mostra que a ocorrência de interrupções em estradas florestais pode ser um problema recorrente, quando não há manutenção adequada ou excesso de tráfego de veículos.

Essa possibilidade de realizar intervenções no sistema durante o seu processamento é um dos pontos de destaque do trabalho, uma vez que, além de realizar o planejamento do transporte florestal, o SMA consegue reorganizar as atividades frente à ocorrência de interrupções de rota.

Para inserir uma restrição de trecho, basta que o usuário acione o botão correspondente à interrupção que ocorrerá e então clique no mapa no local onde a restrição deverá atuar. Caso a interrupção seja temporária, há necessidade de se informar o tempo, em horas, pelo qual a mesma permanecerá ativa.

Ao acompanhar as atividades dos agentes no sistema, é possível verificar quais ações os mesmos estão tomando em função das interrupções inseridas. Assim, pode-se verificar graficamente se o sistema optou por manter o transporte de madeira por uma rota mais longa aguardando que a interrupção temporária seja eliminada (Figura 26a) ou se ele definiu que a melhor alternativa seja a alteração do local de carregamento da madeira enquanto houver restrições de trajetos na malha viária (Figura 26b).

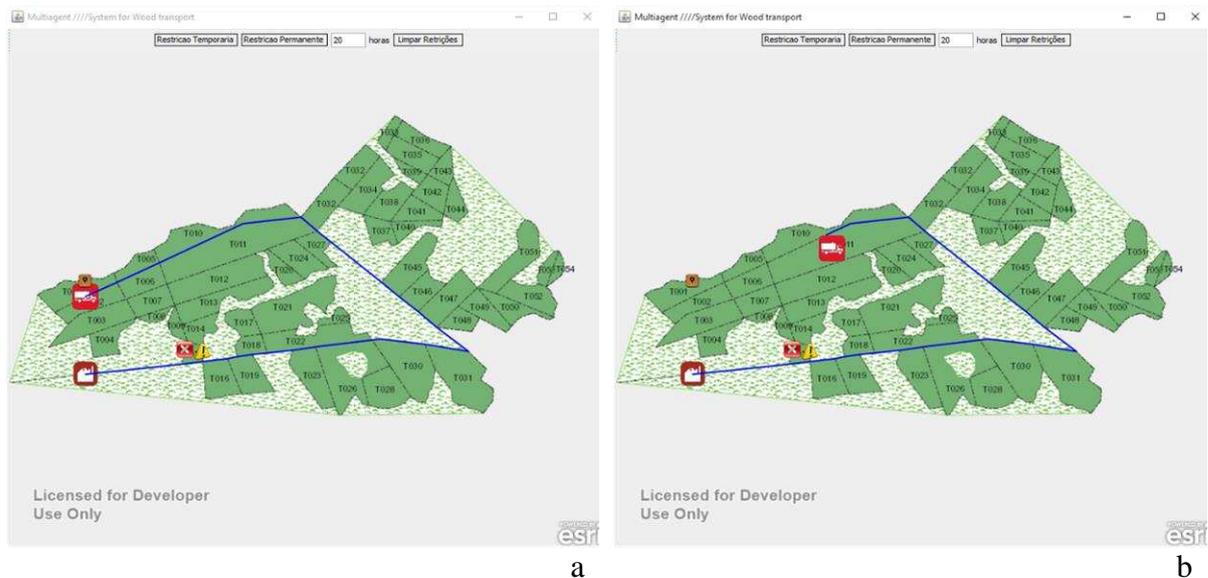


Figura 26 - Mapas de saída/acompanhamento do sistema multiagente mostrando a situação do ambiente considerando o transporte por uma rota mais longa (a) e considerando a alteração da frente de transporte (b). Os ícones em marrom indicam os talhões cuja madeira foi transportada para o pátio, o ícone de alerta em amarelo indica o local onde ocorreu uma interrupção temporária de rota e o ícone em vermelho com um x indica o local onde ocorreu uma interrupção permanente de rota.

7 ESTUDOS DE CASO

7.1 Otimização da frota de veículos em transporte florestal

Considerando a existência de 10 talhões com volume de madeira disponível para transporte, totalizando 32.768 m³, o sistema foi processado para atender uma demanda de madeira posto fábrica igual a 40 m³/h.

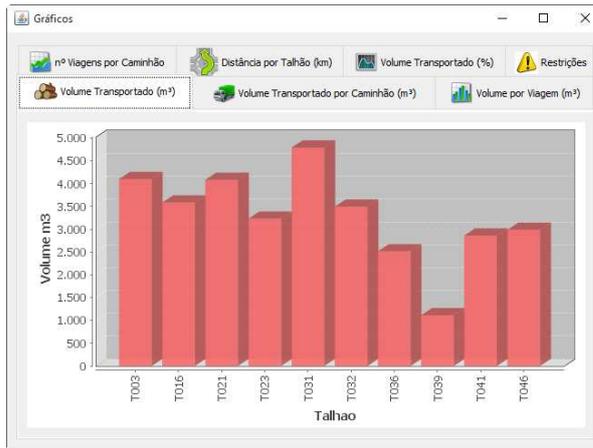
Adotou-se uma taxa de carregamento de 1,4 min/m³ e de descarregamento igual a 1,2 min/m³. Possibilitou-se ao sistema a escolha da quantidade de cada veículo dentre os disponíveis para transporte (Tabela 1).

Os valores de velocidade de tráfego, taxa de carregamento e descarregamento, bem como a capacidade de cada veículo foram obtidos a partir do trabalho de Machado et al. (2009). Já os custos de transporte foram calculados a partir de uma ponderação entre os valores fornecidos por Alves et al. (2013) e Machado et al. (2009).

Tabela 1 - Parâmetros dos veículos disponíveis para transporte

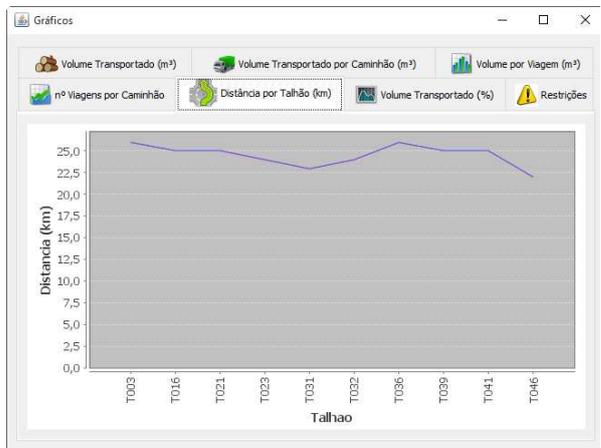
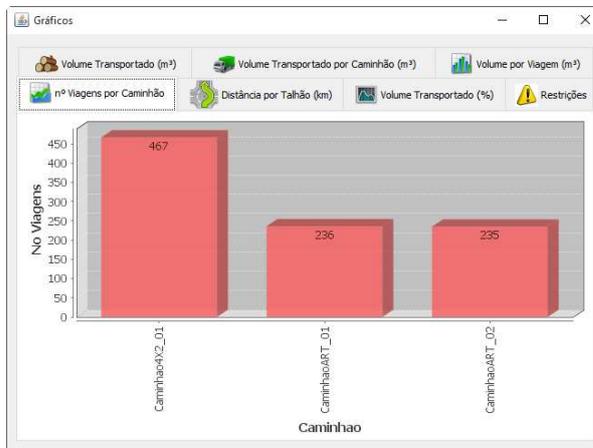
Tipo de Veículo	Capacidade de Carga (m ³)	Velocidade Carregado (km/h)	Velocidade Vazio (km/h)	Velocidade Média (km/h)	Custo de transporte (R\$/m ³ km)
4x2	16	53	64	59	0,36
6x2	28	46	77	61	0,34
Bitrem	90	39	43	41	0,27
Articulado	54	45	53	49	0,29

A otimização da frota de veículos estabeleceu uma necessidade de se utilizar 1 caminhão do tipo 4x2 e 2 caminhões do tipo articulado para suprir o transporte de madeira atendendo a demanda média de volume por hora. Ao final do processamento, todo o volume de madeira disponível nos talhões foi transportado (Figura 27a) em 938 viagens distribuídas entre os diferentes caminhões da frota (Figura 27b e Figura 27c). Para este caso, não houve inclusão de restrições na malha viária (Figura 27d e Figura 28).



a

b



c

d

Figura 27 - Resultados obtidos com a utilização do sistema multiagente considerando quatro diferentes tipos de veículos para realização do transporte de madeira. Volume total transportado por talhão (a). Volume total transportado por veículo (b). Quantidade de viagens realizadas por veículo (c). Distância de transporte entre talhões e pátio de estocagem sem interrupção de rota (d).

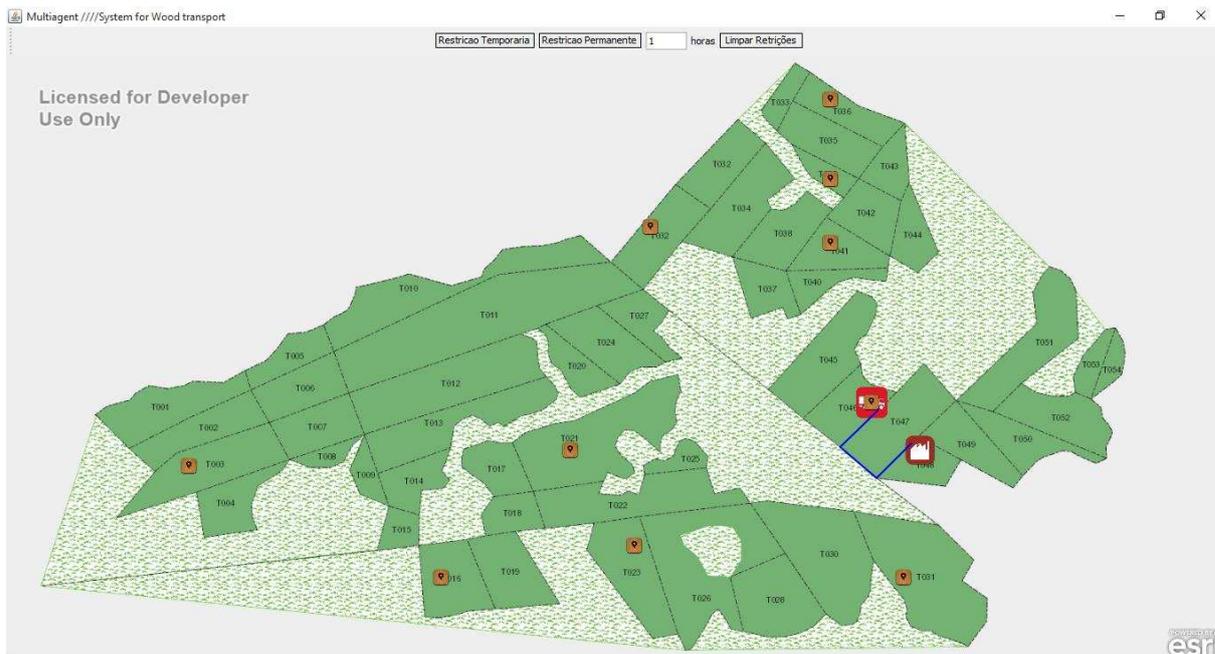


Figura 28 - Mapa de saída do sistema multiagente mostrando a situação do ambiente após concluído o transporte de madeira. os ícones em marrom indicam os talhões cuja madeira foi transportada para o pátio.

Ao criar um novo cenário no qual retirou-se a possibilidade de uso de caminhões do tipo articulado, o sistema otimizou a frota para que fossem utilizados 1 caminhão do tipo 4x2, 1 caminhão do tipo 6x2 e 1 caminhão do tipo bitrem. Tais veículos realizaram um total de 1022 viagens para transportar toda a madeira dos talhões para o pátio de estocagem (Figura 29).

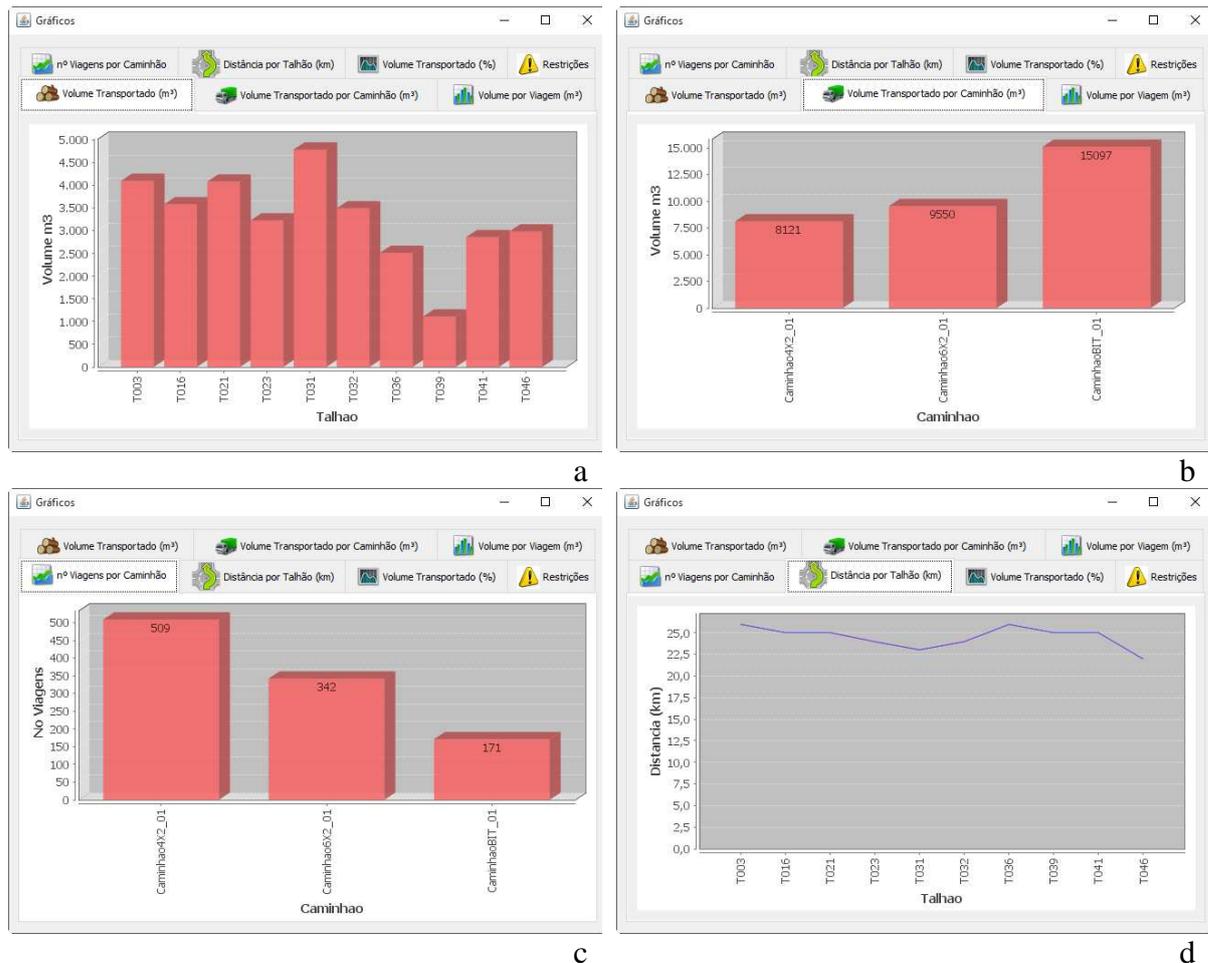


Figura 29 - Resultados obtidos com a utilização do sistema multiagente considerando apenas um tipo de veículo para realização do transporte de madeira. Volume total transportado por talhão (a). Volume total transportado por veículo (b). Quantidade de viagens realizadas por veículo (c). Distância de transporte entre talhões e pátio de estocagem sem interrupção de rota (d).

O custo médio de transporte considerando a segunda avaliação foi igual a R\$ 7,55 por m³ enquanto o valor obtido com a primeira avaliação foi de R\$ 7,35 por m³. Assim, a impossibilidade de se utilizar caminhões articulados no transporte de madeira tornou o custo de transporte de 2,8% maior.

7.2 Replanejamento do transporte florestal considerando interrupção permanente de trechos na malha viária

Considerando a existência de 10 talhões com volume de madeira disponível para transporte, totalizando 32.768 m³, o sistema foi processado para atender uma demanda de madeira posto fábrica igual a 40 m³/h.

Adotou-se uma taxa de carregamento de 1,4 min/m³ e de descarregamento igual a 1,2 min/m³. Possibilitou-se ao sistema a escolha da quantidade de caminhões considerando apenas o tipo 4x2 (Tabela 2). Os valores de velocidade de tráfego, taxa de carregamento e descarregamento, a capacidade de cada veículo e custos de transporte foram obtidos descrição do estudo de caso anterior.

Tabela 2 - Parâmetros dos veículos disponíveis para transporte

Tipo de Veículo	Capacidade de Carga (m ³)	Velocidade Carregado (km/h)	Velocidade Vazio (km/h)	Velocidade Média (km/h)	Custo de transporte (R\$/m ³ km)
4x2	16	53	64	59	0,36

A otimização da frota de veículos estabeleceu uma necessidade de se utilizar inicialmente 4 caminhões do tipo 4x2 para suprir o transporte de madeira atendendo a demanda média de volume por hora. Ao se inserir duas restrições permanentes em diferentes trechos da malha viária mas em rotas que seriam utilizadas pelos agentes transportadores (Figura 30), o sistema recalculou a quantidade de caminhões, o que definiu a inclusão de um quinto veículo ao sistema.

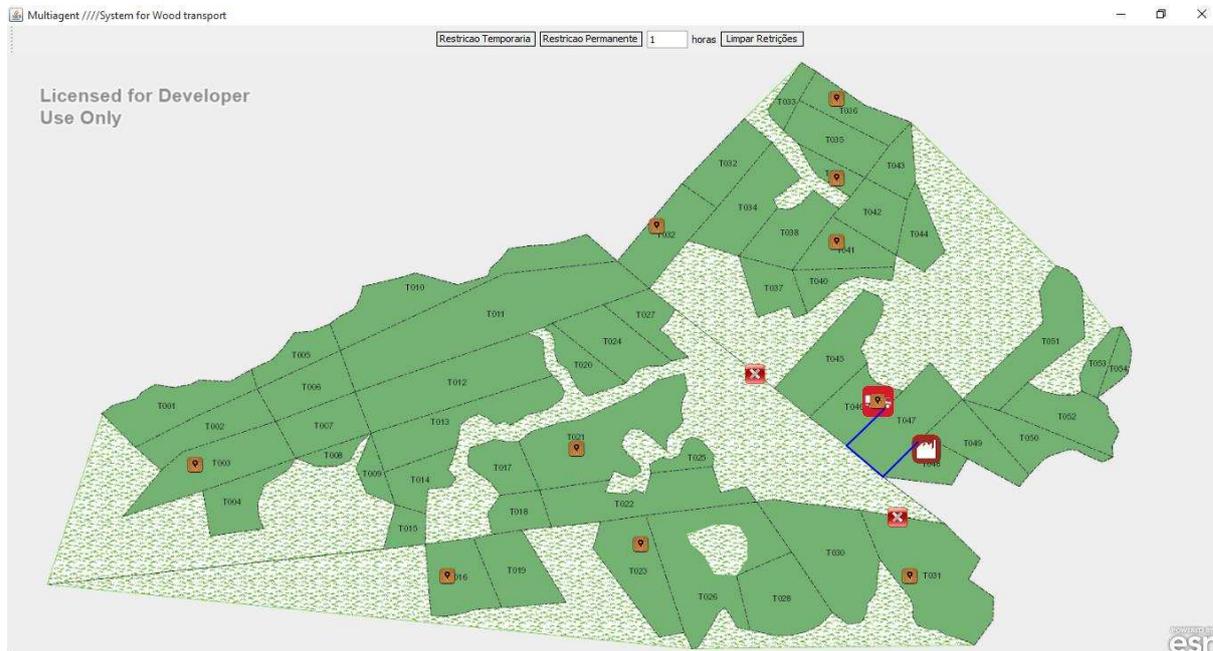


Figura 30 - Mapa de saída do sistema multiagente mostrando a situação do ambiente após concluído o transporte de madeira considerando restrições permanentes de rota. Os ícones em marrom indicam os talhões cuja madeira foi transportada para o pátio e os ícones vermelhos com x indicam os locais onde houve interrupção.

Ao final do processamento, todo o volume de madeira disponível nos talhões foi transportado (Figura 31a) em 2053 viagens distribuídas entre os diferentes caminhões da frota (Figura 31b e Figura 31c).

Houve um aumento dos valores de distância de transporte para cada talhão no ambiente em função da inserção das restrições permanentes de rotas (Figura 31d). Com isso, a distância média de transporte que era inicialmente igual a 24,5 km passou a ser igual a 27,8 km. Em função disso e da inserção de um novo caminhão para realização do transporte, o custo médio alterou-se de R\$ 8,57 por m³ para R\$ 9,65 por m³ de madeira transportada.

A diferença entre a quantidade de madeira transportada pelo veículo Caminhao4x2_05 (Figura 31b) ocorre em função de que este agente teve um menor tempo de atuação no ambiente em relação aos demais, uma vez que foi inserido apenas após a inclusão das restrições de trajeto, sendo sua primeira carga transportada aquela correspondente à 108ª viagem registrada no sistema.

O planejamento da atividade de transporte florestal considerando a possibilidade de restrições permanentes de trechos da malha viária é importante para que o gestor florestal avalie diferentes alternativas que podem ser adotadas frente à ocorrência de tal tipo de problema. Uma das vantagens de utilização do sistema proposto é que a adoção de tais alternativas é subsidiada pela avaliação antecipada dos problemas, por meio da simulação de diferentes cenários e seus impactos no atividade de transporte.

Por exemplo, se a atividade transporte for terceirizada, é desejável que o contrato de prestação de serviço contemple a possibilidade de contratação de novos veículos sem que haja necessidade de se realizar um novo contrato, o que torna o processo de operacionalização do planejamento menos burocrático. Outro exemplo é a avaliação da viabilidade de manutenção em estradas florestais com maior probabilidade de deterioração e ocorrência de impedimentos, comparando seu valor de manutenção com a possibilidade de alteração da rota de transporte. Essas considerações tornam-se mais importantes com o aumento da pressão pela redução de custos em períodos de crise econômica.

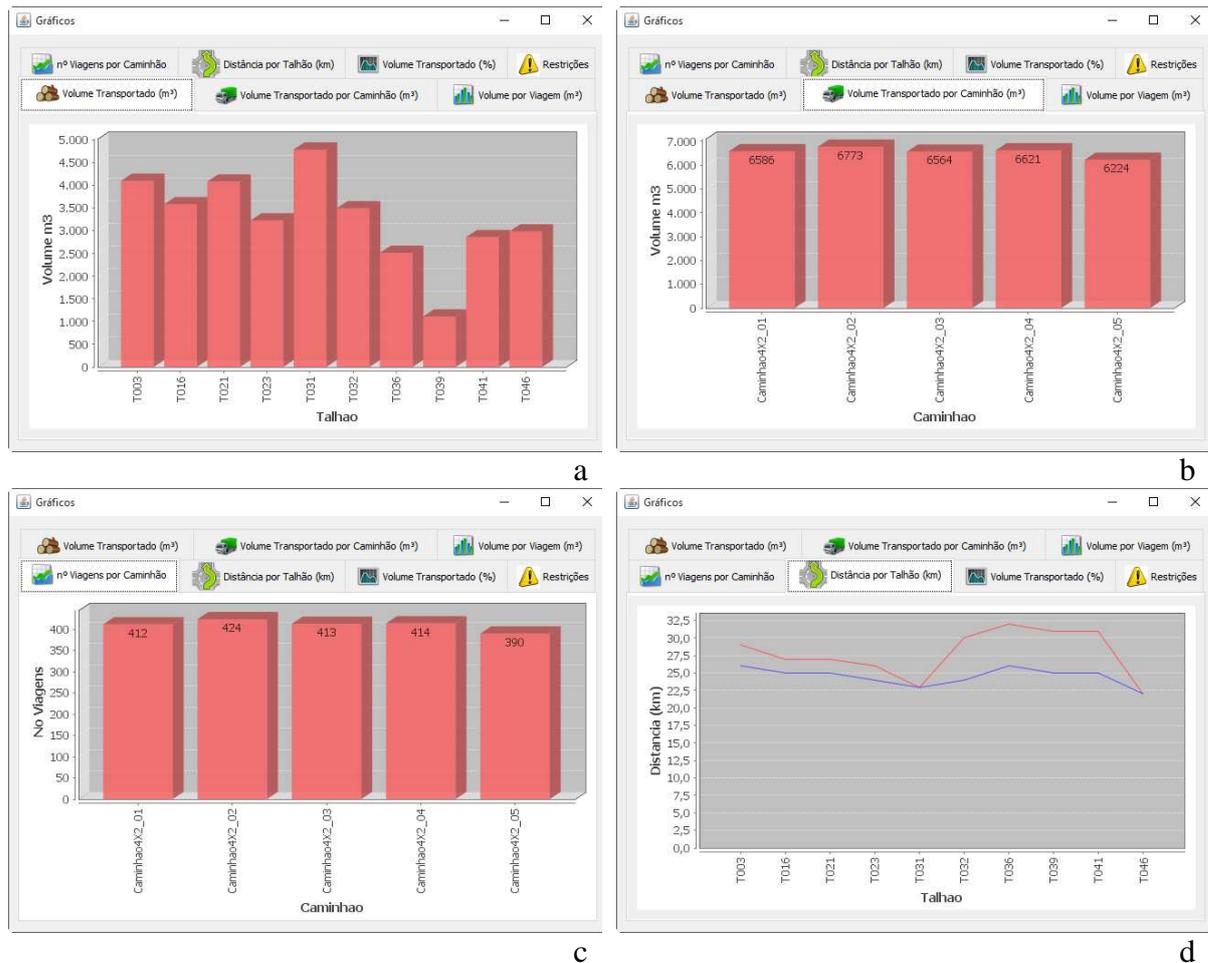


Figura 31 - Resultados obtidos com a utilização do sistema multiagente considerando interrupções permanente de rotas. Volume total transportado por talhão (a). Volume total transportado por veículo (b). Quantidade de viagens realizadas por veículo (c). Distância de transporte entre talhões e pátio de estocagem sem interrupção de rota (linha azul) e com interrupção de rota (linha vermelha) (d).

7.3 Replanejamento do transporte florestal considerando interrupção temporária de trechos na malha viária

Considerando a existência de 10 talhões com volume de madeira disponível para transporte, totalizando 32.768 m³, o sistema foi processado para atender uma demanda de madeira posto fábrica igual a 40 m³/h.

Adotou-se uma taxa de carregamento de 1,4 min/m³ e de descarregamento igual a 1,2 min/m³. Possibilitou-se ao sistema a escolha da quantidade de caminhões dentre os veículos disponíveis para transporte (Tabela 3). Os valores de velocidade de tráfego, taxa de carregamento e descarregamento, bem como a capacidade de cada veículo foram obtidos a

partir do trabalho de Machado et al. (2009). Já os custos de transporte foram calculados a partir de uma ponderação entre os valores fornecidos por Alves et al. (2013) e Machado et al. (2009).

Tabela 3 - Parâmetros dos veículos disponíveis para transporte

Tipo de Veículo	Capacidade de Carga (m ³)	Velocidade Carregado (km/h)	Velocidade Vazio (km/h)	Velocidade Média (km/h)	Custo de transporte (R\$/m ³ .km)
4x2	16	53	64	59	0,36
6x2	28	46	77	61	0,34
Bitrem	90	39	43	41	0,27
Articulado	54	45	53	49	0,29

Para o caso atual considerou-se interrupções temporárias em um trecho da malha viária que estivesse em plena utilização pelo transporte florestal. Tais interrupções foram inseridas em momento dado aleatoriamente. As características das restrições de rota inseridas foram:

- inserção de uma restrição temporária em uma rota atual de transporte de madeira, com intervalo de tempo igual a 20 horas;

- inserção de uma restrição temporária em uma rota atual de transporte de madeira, com intervalo de tempo igual a 50 horas.

A Figura 32 mostra o andamento do transporte de madeira sem que haja ocorrência de interrupção em alguma rota. A otimização inicial do sistema determinou uma frota composta por um caminhão 4x2 e dois caminhões articulados.

Quando ocorre uma interrupção, o sistema, por meio do agente controlador, verifica o que é mais viável economicamente: continuar transportando madeira do talhão atual, mas considerando uma rota mais longa; ou alterar a frente de transporte.

Para o caso em que a restrição de rota durou 20 horas, o sistema definiu que a melhor opção era alterar a rota de transporte mantendo-se o agente carregador no talhão atual (Figura 33). Neste caso, o custo de alteração da frente de transporte foi de R\$ 744,00 enquanto que o custo de se transportar a madeira por uma rota mais longa durante 20 horas foi de R\$ 245,00.



Figura 32 - Mapa de saída do sistema multiagente mostrando a situação do ambiente antes da inserção de restrições temporárias de rota. Os ícones em marrom indicam os talhões cuja madeira foi transportada para o pátio.



Figura 33 - Mapa de saída do sistema multiagente mostrando a situação do ambiente após inserção de uma restrição temporária de rota com duração igual a 20 horas. Os ícones em marrom indicam os talhões cuja madeira foi transportada para o pátio e o ícone de alerta em amarelo indica o local onde ocorreu a interrupção da rota.

Já para o caso em que a restrição duraria 50 horas, a alternativa mais econômica foi utilizar um caminhão prancha para movimentar a máquina de carregamento para outro talhão (Figura 34). Para tomar tal decisão, o agente controlador comparou o custo de movimentação

da máquina de carregamento (R\$ 792,00) com o custo de transportar a madeira por uma rota mais longa pelo período de 50 horas (R\$ 1.843,00). Nessa situação, três talhões foram bloqueados para transporte pelo tempo em que a restrição permaneceu ativa.

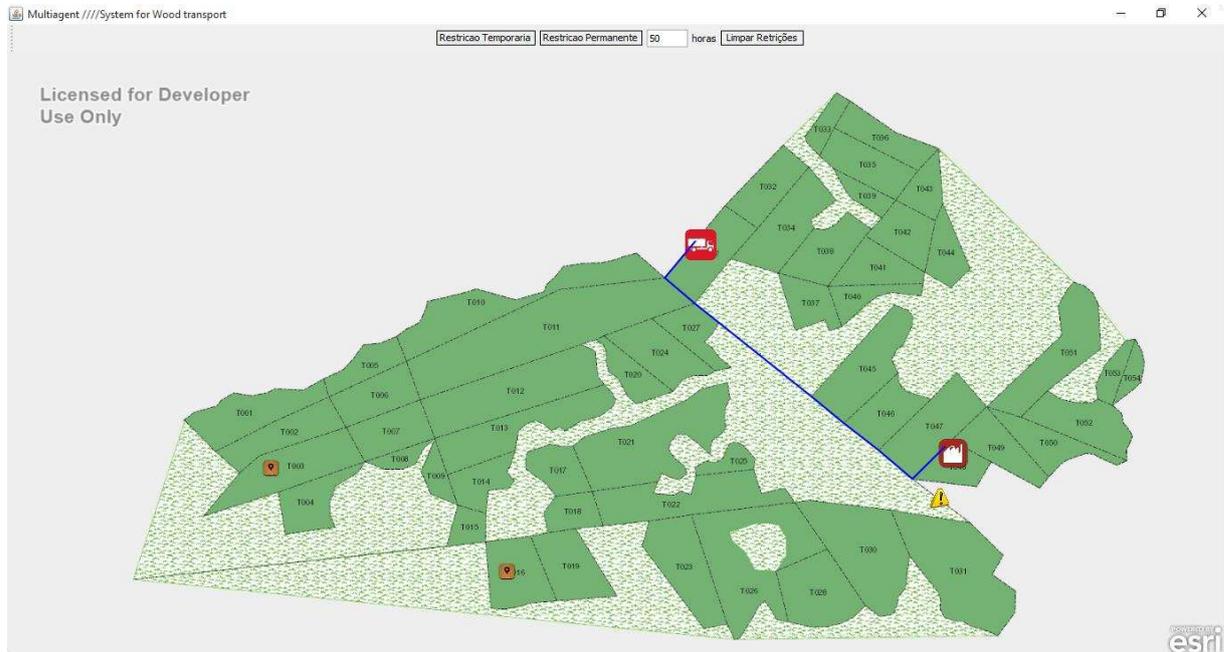


Figura 34 - Mapa de saída do sistema multiagente mostrando a situação do ambiente após inserção de uma nova restrição temporária de rota, agora com duração igual a 50 horas. Os ícones em marrom indicam os talhões cuja madeira foi transportada para o pátio e o ícone de alerta em amarelo indica o local onde ocorreu a interrupção da rota.

Apesar da ocorrência de duas interrupções temporárias durante o processamento do sistema, os agentes transportadores foram capazes de transportar todo o volume de madeira disponível nos talhões até o pátio de estocagem (Figura 35a). Para isso, foi necessário um total de 821 viagens, as quais foram distribuídas entre os diferentes caminhões (Figura 35b e Figura 35c). Tal valor é inferior ao estudo de caso 8.1, o que pode ser explicado pela maior quantidade de viagens realizadas por caminhões maiores, o que por sua vez ocorreu em função das interrupções de rotas.

A distância média de transporte foi alterada durante o período de atividade das restrições temporárias, passando de 24,5 km para 25,9 km (Figura 35d). A Figura 35e é um dos gráficos de acompanhamento do sistema e mostra a evolução das restrições a medida em que elas são ativadas. Dado que ambas atingiram valor igual a 100%, tem-se que o sistema as considerou exatamente pelo tempo informado ao inseri-las no ambiente do SMA.



Figura 35 - Resultados obtidos com a utilização do sistema multiagente considerando interrupções temporárias de rotas. Volume total transportado por talhão (a). Volume total transportado por veículo (b). Quantidade de viagens realizadas por veículo (c). Distância de transporte entre talhões e pátio de estocagem sem interrupção de rota (linha azul) e com interrupção de rota (linha verde) (d). Acompanhamento das restrições de rota (e). Percentual de volume transportado por talhão (f).

Uma das vantagens de utilização de um sistema computacional para auxílio à tomada de decisões está relacionado com a diminuição do fator empírico. O gestor deixa de considerar

apenas as experiências e convicções pessoais para então analisar o problema para com uma maior quantidade de subsídios técnicos. De fato, Machado et al. (2009) destacaram que os aspectos técnico e quantitativo são os mais importantes diante da tomada de decisões no planejamento do transporte florestal.

8 CONCLUSÕES

As conclusões deste estudo são:

- o paradigma de sistemas multiagente pode ser aplicado com eficiência ao problema de planejamento do transporte florestal;
- sistemas multiagente são flexíveis o suficiente para manter a operação de transporte florestal otimizada ao longo do ciclo de funcionamento do mesmo;
- a utilização de ferramentas dinâmicas permite que o gestor florestal tenha maiores condições de avaliar diferentes possibilidades para o planejamento do transporte floresta.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de recente, a teoria de sistemas multiagente tem sido utilizada para solução de problemas em diferentes áreas, inclusive no setor de transporte de passageiros e mercadorias. Entretanto, SMA não tem sido empregados no setor florestal.

O trabalho realizado mostra apenas uma das possíveis aplicações de sistemas multiagente, para a gestão de recursos e operações florestais, sendo outras possibilidades discutidas em Araújo Júnior (2012). Isso ocorre pelo fato de que a modelagem multiagente envolve o uso de linguagem de programação computacional, que não é ensinada nos cursos de Engenharia Florestal no Brasil, o que gera uma dependência de maiores interações com profissionais da área de Ciência da Computação (o que por outro lado pode trazer vantagens).

Apesar de o foco da tese ter sido um problema de transporte florestal de madeira, o sistema pode ser utilizado (com adaptações) para outros problemas, tais como: distribuição de mudas para as áreas de plantio; transporte de passageiros em áreas florestais; e transporte de produtos agropecuários.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, C. A. **Simulação multiagentes aplicada ao planejamento da produção florestal sustentável**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

ALMEIDA, S. J.; FERREIRA, R. P. M.; EIRAS, A. E.; OBERMAYR, R. P.; GEIER, M. Multi-agent modeling and simulation of the *Aedes aegypti* mosquito population. **Environmental Modelling and Software**, v. 25, p. 1490-1507, 2010.

ALVES, R. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N.; LOPES, E. S.; CARMO, F. C. A. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 897-904, 2013.

ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos**. 1997. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

BASKENT, E. Z. Combinatorial optimization in forest ecosystem management modelling. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Amsterdam, v. 25, p. 187-194, 2001.

BASTOS, R. M. **Uma estratégia para alocação de recursos baseados em Sistemas Multiagentes**. 1998. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

BAYKASOGLU, A.; KAPLANOGLU, V. A multi-agent approach to load consolidation in transportation. **Advances in Engineering Software**, v. 42, p. 477-490, 2011.

BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing multi-agent systems with JADE**. John Wiley and Sons, 2007. 286p.

BERGER, R.; ENGLER, J. J. C. Minimização do custo de transporte de madeira de eucalipto no Estado de São Paulo. **IPEF**, n. 12, p. 1-52, 1976.

BERGER, R.; TIMOFEICZYK JR, R.; CARNIERI, C.; LACOWICZ, P. G.; JUNIOR, J. S.; BRASIL, A. A. Minimização de custos de transporte florestal com a utilização da programação linear. **Revista Floresta**, v. 33, n. 1, p. 53-62, 2003.

BOHNLEIN, D.; SCHWEIGER, K.; TUMA, A. Multi-agent-based transport planning in the newspaper industry. **International Journal of Production Economics**, v. 131, p. 146-157, 2011.

BORDINI, R. H.; HUBNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason**. John Wiley & Sons, 2007. 273p.

BOTTER, R. C.; FRANZESE, L. A. G; ABDENUR, L. O. Um sistema para o planejamento e o controle operacional de uma frota dedicada ao transporte de madeira na costa brasileira. 18 Congresso de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuária. 2003; ; 1; ; ; 1; 1; IPIN 2003 - 18 Congresso de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuária.; Havana; CUBA; Português; ; Meio digital; ; .

BOUSQUET, F.; LE PAGE, C. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. **Ecological Modelling**, v. 176, n. 3-4, p. 313–332, set. 2004.

CARRASCO, A.; HERNANDEZ, M. D.; TERNERO, M. C. R.; SIVIANES, F.; OVIEDO, D.; ESCUDERO, J. I. PeMMAS: a tool for studying the performance of multiagent system developed in JADE. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 44, n. 2, p. 180-189, 2014.

CHEN, B.; CHENG, H. H. A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 11, n. 2, p. 485-497, 2010.

DAVIDSSON, P.; HENESEY, L.; RAMSTEDT, L.; TORNQUIST, 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.

DAVIDSSON, P.; WERNSTEDT, F. A multi-agent system architecture for coordination of just-in-time production and distribution. **The Knowledge Engineering Review**, v. 17, n. 4, p. 317–329, 2002.

DIJKSTRA, E. W.; A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.

DONIEC, A.; MANDIAU, R.; PIECHOWIAK, S.; ESPIE, S. A behavioral multi-agent model for road traffic simulation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 21, n. 8, p. 1443–1454, 2008.

FERNANDES, F. C.; SOUZA, S. R.; BORGES; SILVA . Uma arquitetura multiagentes para solução de problemas de otimização combinatória: aplicação ao problema de roteamento de veículos com janela de tempo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41. 2009, Porto Seguro, BA. **Anais... XLI SBPO 2009 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento**, 2009. p. 2181-2192.

FERREIRA, L. **Um modelo de simulação baseado em agentes para análise de cadeias de suprimento**. Tese (Doutorado em Administração). 2009. 180 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

FILHO, G. G.; RIBEIRO, V. G. Simulated annealing e sistemas multiagente na abordagem do timetabling aplicada ao escalonamento de veículos de transporte público. **Revista de Sistemas e Computação**, Salvador, v. 4, n. 1, p. 12-20, 2014.

FIORIOLO, J. C. **Modelagem matemática do Efeito Chicote em cadeias de abastecimento**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

FISCHER, K.; CHAIB-DRAA, B.; MULLER, J. P.; PISCHEL, M.; GERBER, C. A simulation approach based on negotiation and cooperation between agents: a case study. **Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 4, p. 531-545, 1999.

FISCHER, K.; MULLER, J. P.; PISCHEL, M. Cooperative transportation scheduling: an application domain for DAI. **Applied Artificial Intelligence**, v. 10, n. 1, p. 1-33, 1996.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9 ed. AMGH, 2013. 1005 p.

HOLMGREN, J.; DAVIDSSON, P.; PERSSON, J. A.; RAMSTEDT, L. TAPAS: A multi-agent-based model for simulation of transport chains. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 23, p. 1-18, 2012.

JADE. <http://jade.tilab.com>. Acesso em março/2016.

JIFENG, W.; HUAPU, L.; HU, P. System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 8, n. 3, p. 83-89, 2008.

JOVICIC, N. M.; BOSKOVIC, G. B.; VUJIC, G. V.; JOVICIC, G. R.; DESPOTOVIC, M. Z.; MILOVANOVIC, D. M.; GORDIC, D. S. Route optimization to increase energy efficiency and reduce fuel consumption of communal vehicles. **Thermal Science**, v. 14, p. 67-78, 2010.

KOHOUT, R.; EROL, K. In-time agent-based vehicle routing with a stochastic improvement heuristic. In: *Eleventh Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence*, Orlando, FL, 1999.

KONAR, A. **Artificial intelligence and soft computing: behavioral and cognitive modeling of the human brain**. 1ed. CRC Press, 2000. 816 p.

LEITE, A. M. P. **Análise da terceirização na colheita florestal no Brasil**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). 2002. 251 f. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG.

LEITE, A. M. P.; SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C. Análise do ciclo de transporte de madeira para três tipos de caminhões. **Revista Árvore**, v. 17, n. 2, p. 190-201, 1993.

LIMA, M. P. **Metodologia para o planejamento da colheita e do transporte florestal utilizando geotecnologia e pesquisa operacional**. 2009. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras.

LIMA, M. P.; CARVALHO, L. M. T.; MARTINHAGO, A. Z.; OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, S. P. C.; DUTRA, G. C.; OLIVEIRA, T. C. A. Methodology for planning log stack using geotechnology and operations research. **Cerne**, v. 17, n. 3, p. 309-319, 2011.

LOPES, E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P.; RIBEIRO, C. A. A. S. Harvesting and wood transport planning with SNAP III program (Scheduling and Network Analysis Program) in a Pine plantation in southeast Brazil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 831-836, 2003.

LP SOLVE. Mixed Integer Linear Programming (MILP) Solver. Disponível em: <<http://lpsolve.sourceforge.net/>>. Acesso em março/2016.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S.; BIRRO, M. H. B.; MACHADO, R. R. **Transporte Rodoviário Florestal**. Editora UFV, 2009. 217 p.

MACHADO, C. C.; MACHADO, R. R.; SILVA, E. A.; SOUZA, M. F. G. Avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira de áreas de fomento florestal com uso de rede de Petri. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1159-1167, 2009.

MACHADO, R. R.; SILVA, M. L.; MACHADO, C. C.; LEITE, H. G. Avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira utilizando Rede de Petri em uma empresa florestal de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 999-1008, 2006.

MOURA, A. V.; SCARAFICCI, R. A. hybrid heuristic strategies for planning and scheduling forest harvest and transportation activities. In: *Proceedings of 11th IEE International Conference on Computational Science and Engineering*, São Paulo, Brasil, 2008. p. 447-454.

NICOARA, M. E.; HAIDU, I. Creation of the roads network as a network dataset within a geodatabase. **Geographia Technica**, v. 6, n. 2, p. 81-86, 2011.

OGLIARI, I.; BAGATINI, D. D. S.; FROZZA, R. Processo de alocação de recursos utilizando sistema multiagente. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO. 25, 2005, São Leopoldo, RS. **Anais eletrônicos: A universalidade da computação: um agente de inovação e conhecimento**. Disponível em: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/enia/2005/031.pdf> . Acesso em: 25/07/2015.

OLIVEIRA, R. B. **Desenvolvimento de uma arquitetura multiagentes baseada em metaheurísticas com uma abordagem adaptative learning search**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

OLIVEIRA, R. J.; GLERIANI, J. M.; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; CORDEIRO, S. A. Análise da trafegabilidade em estradas florestais utilizando métodos computacionais. **Revista Árvore**, v. 37, n. 2, p. 355-360, 2013.

PARUNAK, H. V. D. Agent in overalls: experiences and issues in the development and deployment of industrial agent-based systems. **International Journal of Cooperative Information Systems**, v. 9, n. 3, p. 209-227, 2000.

REZKI, N.; KAZAR, O.; MOUSS, L. H.; KAHLOUL, L.; REZKI, D. On the use of multi-agent systems for the monitoring of industrial systems. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 12, p. 111-118, 2016.

RIBEIRO, B. A. M.; CAIXETA FILHO, J. V. Coordenação vertical do transporte de madeira: análise empírica dos arranjos institucionais existentes na indústria brasileira de celulose. **Gestão & Produção**, v. 7, n. 1, p. 1-16, 2000.

RIX, G.; ROUSSEAU, L. M.; PESANT, G. A column generation algorithm for tactical timber transportation planning. **Journal of the Operational Research Society**, v. 66, n. 2, p. 278-287, 2014.

ROSCHER, M.; FJELD, D.; PARKLUND, T. Spatial patterns of round wood transport associated with mobile data systems in Sweden. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, n. 1, p. 53-59, 2013.

RUSSEL, S.; NORVING, P. **Inteligência Artificial**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Campos, 2004. 1021p.

SEIXAS, F.; WIDMER, J. A. Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira utilizando-se de programação linear não inteira. **Floresta**, n. 46, p. 107-118, 1993.

SILVA, M. L.; OLIVEIRA, R. J.; VALVERDE, S. R.; MACHADO, C. C.; PIRES, V. A. V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; REZENDE, J. L. P.; LIMA, J. E.; CARVALHO, K. H. A. Elaboração de modelo de previsão de preço da madeira de *Eucalyptus spp.* **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 41-52, 2010.

SOUSA, R. A. T. M.; RODRIGUEZ, L. C. E.; SEIXAS, F.; FILHO, J. V. C. Eficiência e otimização do transporte principal de toras curtas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 62, p. 130-146, 2002.

SOUZA, D. O. **Algoritmos genéticos aplicados ao planejamento do transporte principal de madeira**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). 2004. 169 f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR.

SUN, R. **Cognition and Multi-Agent Interactions: From Cognitive Modelling to Social Simulation**. Cambridge University Press, 2005.

TRONCOSO, J. J.; GARRIDO, R. A. Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming. **Forest Policy and Economics**, v. 7, n. 1, p. 605-633, 2005.

VEIGA, A. M. H. **A multiagent based shop floor transportation system simulator**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova de Lisboa.

VIEGAS, F. **Planejamento distribuído em um sistema multi-agente para pcp**. Dissertação (Mestrado em Informática). 1998. 30 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS.

VLASSIS, N. A concise introduction to multi-agent systems and distributed AI. Informatics Institute, University of Amsterdam, September. 2003.

WILLIAMSON, G.; NIEUWENHUIS, M. Integrated timber allocation and transportation planning in Ireland. **Journal of Forest Engineering**, v. 5, n. 1, p. 7-15, 1993.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multiagent Systems**. John Wiley & Sons, Chichester, 2002. 348p.

ZHENGANG, D.; LINNING, C.; LI, Z. Improved multi-agent system for the vehicle routing problem with time window. **Tsinghua Science and Technology**, v. 14, n. 3, p. 407-412, 2009.