

# CONTROLE DE TRÁFEGO DE TRENS UTILIZANDO SISTEMAS MULTI-AGENTES

**José Antonio Sánchez Guerrero**

jasg@dca.fee.unicamp.br

**Ricardo Ribeiro Gudwin**

gudwin@dca.fee.unicamp.br

**Luis Alberto Ramírez Domínguez**

lar@dca.fee.unicamp.br

**Fernando Antônio Campos Gomide**

gomide@dca.fee.unicamp.br

Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial – DCA

Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação – FEEC

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

DCA/FEEC/UNICAMP

Caixa Postal 6101, CEP. 13083-970,

Campinas, SP, Brasil

Telefone: +55(19) 3788-3706 Fax: +55(19) 3289-1395

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova abordagem ao problema de controle de tráfego de trens utilizando uma arquitetura multi-agentes distribuída. Nosso principal objetivo aqui é a solução de conflitos de tráfego, visando evitar colisões entre trens que viajam por linhas simples em sentidos opostos. O projeto (*design*), implementação e simulação da arquitetura proposta realizou-se com auxílio das Redes de Agentes (RA). As RA são uma ferramenta formal e computacional para a especificação e simulação de sistemas dinâmicos a eventos discretos, dotadas de características particularmente interessantes dentro do escopo dos chamados sistemas inteligentes, tais como capacidade de aprendizagem e adaptação. Os resultados obtidos são ainda preliminares, mas encorajadores.

**Palavras-chave:** Sistemas Inteligentes, Simulação de Sistemas Inteligentes, Agentes, Sistemas Multi-agentes, Controle de Tráfego.

## ABSTRACT

This work presents a new approach to the traffic control problem of trains using a distributed multi-agents architecture. Our main goal here is the solution of traffic conflicts, aiming at the avoidance of collisions among trains traveling on single tracks by opposite ways. The design, implementation and simulation of the proposed architecture were carried out with the aid of Agent Networks (ANs). ANs are a formal and computational tool for the specification and simulation of discrete event dynamical systems, endowed with characteristics particularly interesting under the scope of the so called intelligent systems, like learning and adaptation capacity. The results obtained, despite preliminary, encouraged us to further developments.

**Key-words:** Simulation of Intelligent Systems, Agents, Multi-agent Systems, Train Traffic Control.

## 1 INTRODUÇÃO

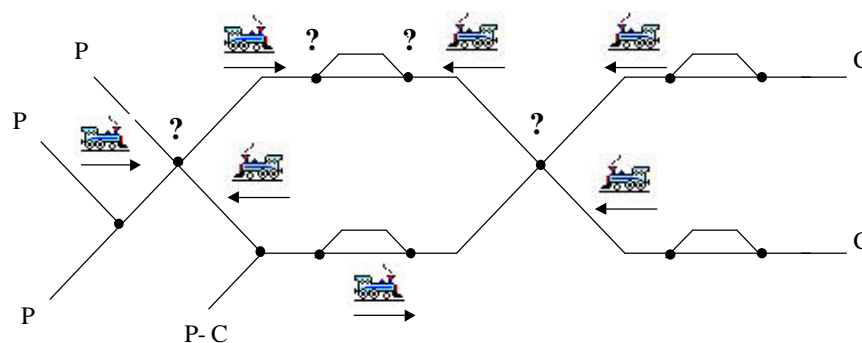
Normalmente, o problema de controle de tráfego de trens em linhas ferroviárias é abordado segundo uma perspectiva puramente lógica. Neste caso, as chamadas metodologias centralizadas encontram-se dentre as primeiras tentativas de solução a serem utilizadas. Tais metodologias pressupõem que todas as informações necessárias à resolução do problema encontram-se centralizadas e portanto disponíveis nos instantes de decisão de controle. Entretanto, tratando-se de implementações reais do problema, nem sempre todas as informações necessárias estão disponíveis, dadas as grandes distâncias que podem envolver uma malha ferroviária. E mesmo quando elas podem estar disponíveis, o custo para que todos os dados sejam disponibilizados pode ser impraticável. As dimensões da área controlada e, conseqüentemente, a intensidade do tráfego são fatores que limitam as capacidades dos cálculos e tomada de decisões, impondo limites no tamanho da área controlada, caso se insista em utilizar uma estratégia de controle centralizada. Devido a estas restrições, o desenvolvimento de modelos reais de otimização para planejamento das escalas e tráfego de trens esteve prejudicado por muito tempo, embora nos últimos anos tenham havido alguns avanços neste área. Modelos recentes exibem um considerável aumento na capacidade de previsão, incorporando uma grande quantidade de restrições e trazendo de volta esse tema à literatura.

O planejamento do transporte por vias férreas tem sido abordado, freqüentemente, através de modelos em rede onde cada nó representa uma estação e cada arco representa uma linha ferroviária unindo duas estações (vias para o tráfego). Uma boa introdução sobre as características modernas de abordagem ao problema pode ser encontrada em Cordeau, Toth & Vigo (1998). Neste artigo, os autores compilaram informações sobre os mais variados modelos e metodologias aplicados no controle de sistemas ferroviários, ressaltando o problema dos planejamentos táticos e operacionais. O planejamento operacional diz respeito ao problema de controle do tráfego nas linhas. Segundo Shain (1999), as principais técnicas utilizadas em seu tratamento podem ser categorizadas em três grandes grupos: Simulação, Programação Matemática e Sistemas Especialistas. Contudo, o problema ainda está longe de soluções satisfatórias, considerando-se as metodologias mencionadas. Por exemplo, o uso de sistemas especialistas redundam em uma metodologia de controle centralizada. Na prática, conforme observamos anteriormente, a adoção de soluções deste tipo limitam as dimensões da área controlada o que as torna ineficientes para problemas de grande porte como é o caso dos problemas com características do mundo real. Para

tentar resolver essa questão, começaram a surgir idéias para sistemas de controle distribuídos, resolvendo parte dos problemas encontrados nas metodologias centralizadas no que se refere à disponibilização das informações para a decisão de controle. Um exemplo de solução distribuída pode ser encontrado em Vernazza & Zunino, (1990). Neste trabalho considera-se o comportamento global do sistema a partir das decisões locais tomadas por cada controlador dentro de sua área específica. Outros trabalhos usando soluções distribuídas podem ser encontrados em Li-min (1991) e Li-min (1994). Nestes trabalhos, propõem-se soluções de controle distribuídas em diferentes níveis hierárquicos, aplicadas ao problema de despachos de trens.

## 2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Em nosso estudo, estaremos utilizando a seguinte topologia da rede ferroviária, conforme mostrada na Figura 1.



onde: [P, C] – Estações de tipo [Produtor, Consumidor] e ? – pontos de conflito (desvios e cruzamentos)

Figura 1. Exemplo gráfico da rede ferroviária estudada.

O exemplo da Figura 1 ilustra um sistema de rede ferroviária cuja topologia acarreta sérias dificuldades para a obtenção das ações de controle.

Os principais elementos envolvidos neste problema são: o trem, a linha férrea e as estações de controle. As principais características relacionadas a estes elementos estão sumarizadas na Tabela 1.

	<b>Trem</b>	<b>Linha Férrea</b>	<b>Estação de Controle</b>
<b>CE</b>	Identificador Classe Rotas	Identificador Classe	Identificador
<b>CD</b>	Prioridade Posição Estado Sentido	Prioridade Estado	Prioridade Conexão com estações vizinhas

CE - Características Estáticas e CD Características Dinâmicas  
Tabela 1. Características dos principais elementos.

Os **identificadores** são referências a cada elemento.

Para cada trem:

A **classe** pode ser: *de passageiros* ou *cargueiro*. A **prioridade** está relacionada à classe, sendo mais prioritário o trem *de passageiros* (trabalhos futuros incluirão outros elementos para o cálculo da prioridade, tais como atrasos, etc). A **posição** determina a localização física dentro do segmento de linha férrea. O **estado** pode ser *parado* ou *movimentando-se*. O **sentido** pode ser *direto* ou *reverso*.

Para cada linha férrea:

A **classe** pode ser: *simples* ou *desvio*. A **prioridade** é fixada segundo critérios práticos (neste trabalho recebe valor arbitrário). O **estado** pode ser *ocupada* ou *livre*.

Para cada estação de controle:

A **prioridade** é semelhante à da linha férrea. As conexões com estações vizinhas determinam o conjunto de agentes que influenciam a decisão local.

### 3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Analisando todos os elementos descritos na descrição do problema, desenvolveu-se uma arquitetura de sistemas multi-agentes para estabelecer um controle do tráfego nos pontos de conflitos. Esta solução e seus resultados serão apresentados nas próximas subseções. Além disso será apresentada a ferramenta utilizada para simular esta solução.

### 3.1 ABORDAGEM MULTI-AGENTES

Dentre várias soluções estudadas seguindo o paradigma dos sistemas multi-agentes e da Inteligência Artificial Distribuída (WEISS, 1999), optou-se pela arquitetura da Figura 2, a seguir.

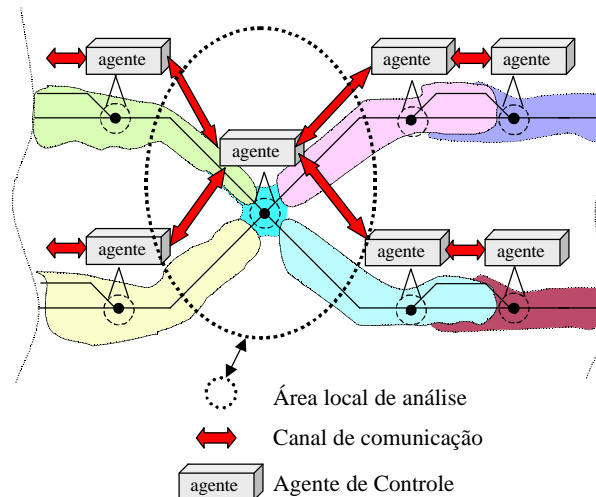


Figura 2. Arquitetura Multi-agentes.

Como observado, para cada ponto de conflito (desvio ou interseção de linhas) atribui-se um agente de controle. Cada agente terá seu escopo de ação definido e limitado pela topologia da rede. Assim, um agente terá total controle dos segmentos de linha que o une com seus agentes vizinhos e só entra em ação quando um trem estiver circulando por um desses segmentos de linha e dirigindo-se até o agente em questão.

Em um ambiente multi-agentes o processo de coordenação entre os agentes é dado pelos processos de cooperação e/ou competição. Nos processos de cooperação, os agentes compartilham informações e/ou resultados com a finalidade de obter um objetivo ou meta global comum. Nos processos de competição, os agentes disputam por um recurso ou por executar alguma tarefa que resulte na satisfação de seus objetivos ou metas.

Para o caso em questão, a coordenação é dada a través do processo de competição (ver Figura 3) onde cada agente compete com os agentes vizinhos por um recurso que não pode ser compartilhado, sendo este recurso o trecho de linha requisitado pelo trem que está no seu “foco de atenção”.

### 3.1.1 PROTOCOLOS DE INTERAÇÃO

Os protocolos dividem-se em dois grupos :

<i>Coordenação</i>	<i>Controle</i>
Comunicação Competição	Decisões locais Decisão global

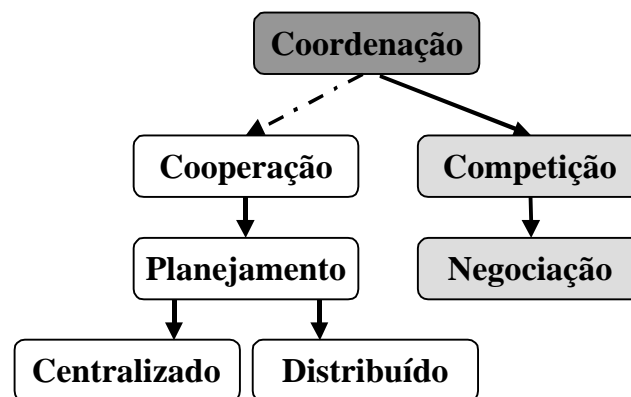


Figura 3. Processo de coordenação.

A comunicação realiza-se por meio de um canal de comunicação comum que pode ser implementado utilizando uma arquitetura tipo *Blackboard*. Para a arquitetura que está sendo apresentada, o número de canais de comunicação é igual ao número de segmento das linhas férreas compartilhadas pelos agentes de controle. Uma variante pode ser a utilização de um canal de comunicação comum a todos os agentes de controle (por exemplo uma banda de frequência de rádio comum, sendo implementada também através de uma arquitetura *Blackboard*). A competição ocorre na negociação dos segmentos de linha, que podem ser requisitados em comum por dois ou mais agentes ao mesmo tempo. As decisões locais são tomadas por cada agente dependendo dos estados das linhas e os trens correspondentes a cada agente. Aqui se dão duas etapas: análise das prioridades e postagem de mensagens. A decisão global do controle será a ação conjunta de cada agente. Para efetuar esta etapa, cada agente deverá receber a ação dos agentes vizinhos, reavaliar a sua proposta de acordo com as ações dos agentes vizinhos e executar a ação correspondente.

**Algoritmo de controle para cada agente****1.-** Seleciona os trens para os quais pode tomar alguma decisão

- **Se** houver trens em posição de tomada de decisão **Então** avalia a prioridade de cada trem, selecionando o trem de maior prioridade para seguir sua rota
- Posta uma mensagem informando o seu interesse em determinado segmento de linha (sempre que a linha estiver desocupada)
- Recebe as propostas dos agentes vizinhos interessados no mesmo segmento de linha postado
- **Se** a proposta recebida for maior **Então** reavalia sua proposta, ou seja, muda o estado da ação a ser executada

**2.-** Executa ações de controle para todos seus trens

### 3.2 REDES DE AGENTES

As Redes de Agentes (RA) foram introduzidas por Guerrero (GUERRERO, GOMES & GUDWIN, 2000) (GUERRERO, 2000) como uma ferramenta formal e computacional para o projeto, análise e simulação de sistemas a eventos discretos, com algumas vantagens em relação a outras ferramentas matemáticas correlatas. Sendo os sistemas de controle de tráfego (aéreo, rodoviário, ferroviário, etc) exemplos típicos de sistemas a eventos discretos, a escolha das RA para a modelagem do problema foi uma decisão natural.

As RA são na verdade uma especialização das Redes de Objetos (RO) introduzidas por Gudwin (1998). As RO (e por conseguinte as RA) apresentam uma série de vantagens quando comparadas com outras ferramentas encontradas na literatura, tanto na facilidade de interpretação do modelo (que é a qualidade explorada neste artigo), como no aumento de sua capacidade de modelar fenômenos que não são facilmente modelados com outras ferramentas equivalentes. As RO são particularmente interessantes na modelagem de características associadas a sistemas inteligentes, tais como capacidade de aprendizagem e adaptação. Estas características permitem o estudo de sistemas inteligentes como casos especiais de sistemas dinâmicos a eventos discretos. Entretanto, apesar de suas qualidades, as RO foram formalmente definidas com características muito genéricas, dado o escopo de representação para o qual elas foram propostas. Este fato dificultava a implementação de uma ferramenta computacional genérica que pudesse gerar automaticamente seu comportamento sem apelar para uma recodificação caso a caso. Na tentativa

de viabilizar essa implementação computacional, por meio de uma especialização das RO se chegou nas RA.

A principal restrição imposta pelas RA sobre as RO, está na forma de encontrar a “função de seleção” (GUERRERO, 2000) (função ou conjunto de funções responsáveis pelo gerenciamento da dinâmica das RO) a ser utilizada. As RO não faziam restrições sobre a função de seleção (o que implica uma maior flexibilidade), mas o preço a se pagar foi a ausência de critérios de tomada de decisão definidos explicitamente no modelo a ser desenvolvido. Isso exigia a definição de mecanismos complementares (algoritmos externos) externos ao formalismo da rede. Nas RA, todas as informações importantes devem ser incluídas de maneira explícita no modelo que está sendo desenvolvido. A vantagem é que nenhum mecanismo adicional necessita ser incorporado, ou seja, a rede é autônoma em seu funcionamento. Por esta razão, as RA podem ser automatizadas. Em outras palavras, foi possível criar uma ferramenta automática de simulação para as RA, o que nem sempre é possível para uma rede de objetos qualquer.

O algoritmo utilizado pelas RA para obter a função de seleção de forma automática é o chamado “algoritmo **BMSA** (*Best Matching Search Algorithm*)”. De maneira geral, este algoritmo basicamente avalia todos os potenciais objetos (ou agentes) da rede, gerando o “desejo” ou interesse que têm alguns dos objetos na rede em consumir um objeto ou um conjunto de objetos, eliminando todas as possíveis contradições que possam existir

Como resultado do processo de criação das RA obteve-se uma ferramenta computacional denominada **ONtoolkit** (*Object Network toolkit*). Com este resultado deu-se um salto qualitativo e quantitativo na aplicabilidade do conceito de rede de agentes, sendo que de uma ferramenta puramente formal tornou-se uma ferramenta de aplicação útil, simples de ser utilizada e apropriada para pesquisas científicas na área dos sistemas a eventos discretos, especialmente na área dos sistemas inteligentes. Esta ferramenta é mostrada na Figura 4.



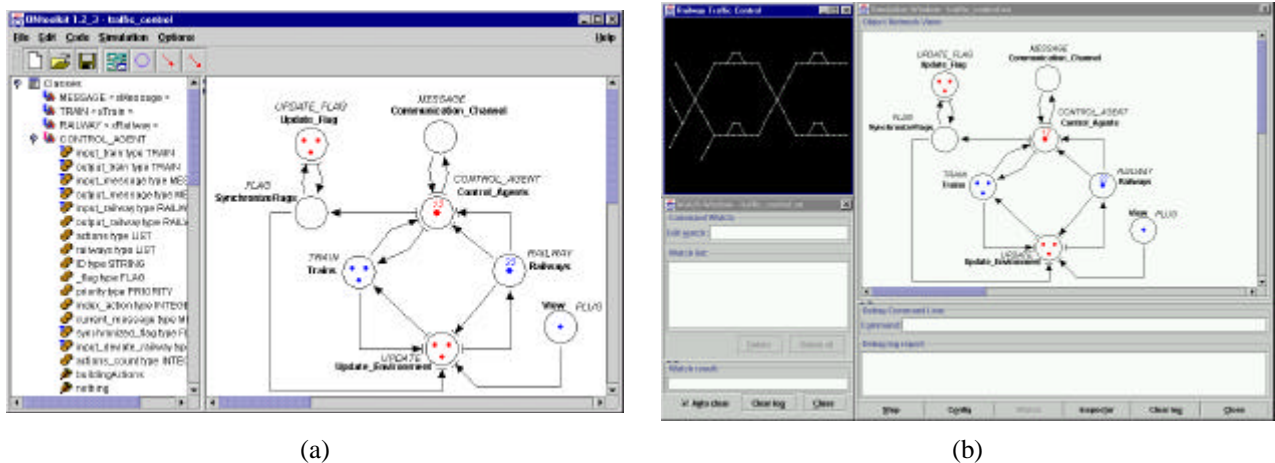


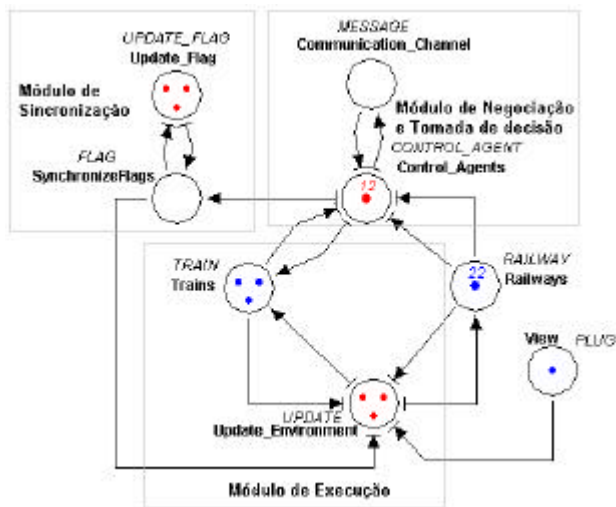
Figura 4. Principais módulos do ONtoolkit. (a) Módulo de Edição. (b) Módulo de Simulação.

### 3.2.1 REDE DE AGENTES PARA A ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA

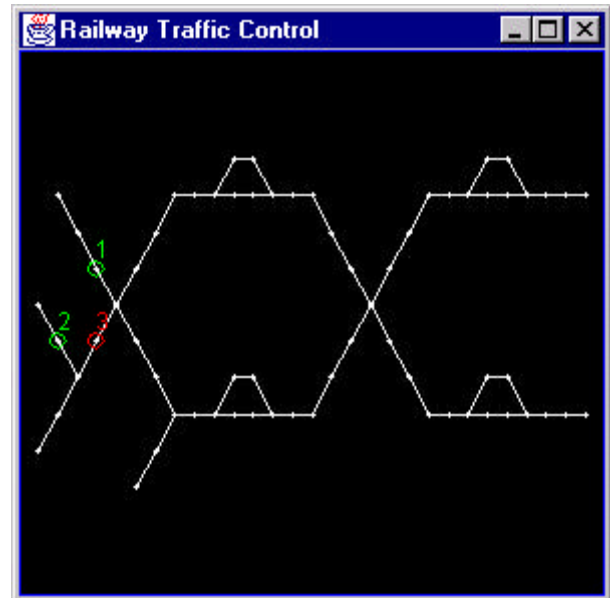
Na Figura 5, é mostrada a rede de agentes que implementa a arquitetura de controle proposta.

Nesta rede de agente existem 8 lugares. Destes, 5 são lugares passivos e 3 lugares ativos. No lugar **Trains** encontram-se os diferentes trens que estão rodando na rede ferroviária. No lugar **Railways** tem-se os agentes que representam os trechos de linhas a serem usadas e compartilhadas pelos trens. No lugar **Control\_Agents** podem-se encontrar os objetos que representam os agentes de controle encarregados de realizar a negociação e controle para evitar a colisão entre trens em algum trecho de linha. O lugar **Communication\_Channel** simula o canal de comunicações utilizado pelos agentes de controle para o intercâmbio de mensagens no processo de negociação.

No lugar **Update\_Environment** encontram-se os agentes encarregados de executar as ações determinadas no *Módulo de Negociação e Tomada de Decisões* e atualizar o ambiente. Para garantir o sincronismo entre os *Módulos de Negociação e Tomada de Decisões* e o *Módulo de Execução* foi necessário criar o *Módulo de Sincronização* composto de dois lugares, um deles responsável pela atualização dos *flags* enviados pelos agentes de controle, visando garantir que os agentes de execução só executem depois que todos os agentes de controle tenham concluído seu processo de tomada de decisões.



**Figura 5.** Rede de Agente para o controle de colisão do tráfego ferroviário.



**Figura 6.** Interface de visualização utilizada para representar o ambiente de teste utilizado nas simulações.

Com a finalidade de poder visualizar o que estaria acontecendo na rede ferroviária foi necessário conectar à rede de agentes uma interface gráfica (ver Figura 6) que representa o ambiente de teste utilizado na simulação da arquitetura de controle proposta. Essa conexão é representada pelo agente contido no lugar **View**.

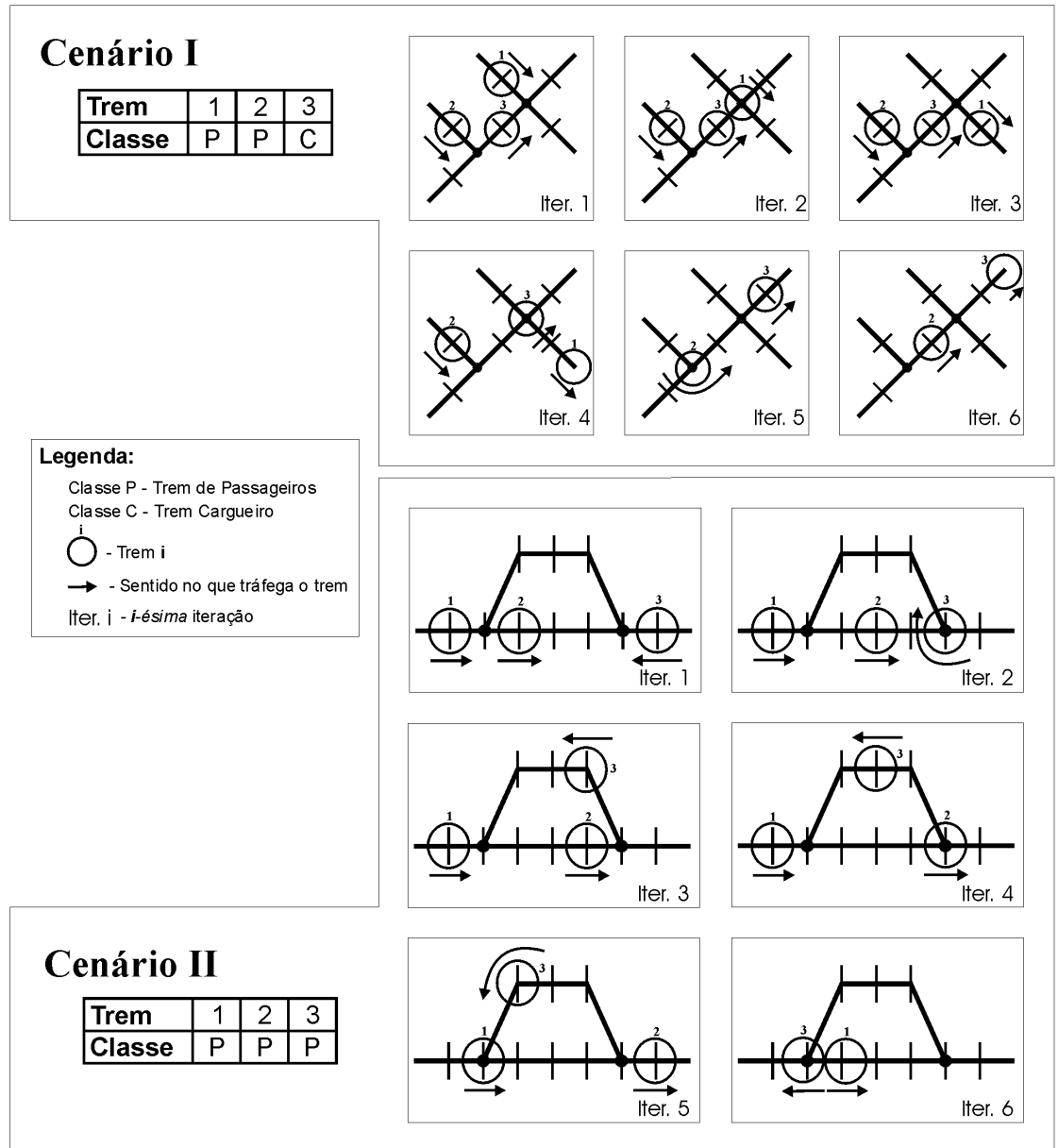
### 3.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Diferentes simulações foram realizadas fixando determinadas condições iniciais que provocassem situações de conflito. Os resultados das iterações foram coletados e alguns dos passos são mostrados na Figura 7. Como pode observar-se, os mecanismos de tomada de decisão estabelecem o controle do tráfego evitando as colisões, tendo sempre a prioridade como ponto essencial na hora de decidir os novos estados de todos os trens. Assim, cada trem recebe ações de *parar* ou *continuar* segundo o contexto analisado. É bom destacar que tais ações de controle somente são geradas quando o trem encontra-se em posição crítica, neste caso um ponto antes do cruzamento. Caso não esteja em uma posição crítica, o trem continua seu percurso normal.

## 4 CONCLUSÕES

Podemos concluir resumindo os aspectos fundamentais do trabalho:

- Resultados ainda preliminares, mas promissores segundo as estratégias propostas, já que foram realizadas algumas simulações com diferentes configurações de conflito, sendo que em todas elas a estratégia proposta consegue evitar as colisões;
- Modularidade e flexibilidade do sistema de controle, o que permite que com poucas alterações você consiga alterar seu comportamento;
- Resolução de problemas de controle sem limitação do tamanho da área controlada, já



que basta colocar um agente de controle em cada zona de conflito;

- Facilidades de simulação e análise dos resultados através das interfaces que oferecem as Redes de Agentes.

Figura 7. Estudo de casos

## 5 TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros pretendemos considerar os seguintes elementos:

- Novas estratégias de controle que permitam evitar os bloqueios de linha, pois o sistema não estima o que pode acontecer em passos futuros, uma vez que já foi tomada uma decisão atual;
- Incorporar novos elementos no cálculo das prioridades do trem, entre eles a demora calculada com base nos horários de despachos planejados, etc.;
- Estudo de novas arquiteturas multi-agentes que possam reduzir o número de agentes de controle;
- Comparação com estratégias de controle centralizada analisando-se o custo computacional, factibilidade e aplicabilidade em problemas de grande porte.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORDEAU, J., TOTH, P. VIGO, D. A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. **Transportation Science**, [s.l],v.32, n.4, p.380-404, 1998.

GUDWIN, R. R. **Contribuições ao Estudo Matemático de Sistemas Inteligentes**. Campinas, 1996. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, 1996.

GUERRERO, J. A. S., GOMES, A. S. R., GUDWIN, R. R. A Computational Tool to Model Intelligent Systems. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 1999, São Paulo. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente SBAI'99. São Paulo : Universidade de São Paulo, USP, 2000. P.227-232.

GUERRERO, J. A. S. **Rede de Agentes: Uma Ferramenta para o Projeto de Sistemas Inteligentes**. Campinas, 2000. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, 2000.

LI-MIN, J. **Fuzzy Control and Decision-Making and the applying of Railway Automation**. [s.l], 1991. Tese (Doutorado) – China Academy of Railway Science, Jul. 1991.

LI-MIN, J., XI-DI, Z. Distributed Intelligent Railway Traffic Control Based on Fuzzy Decision Making. **Fuzzy Sets and Systems**. [s.l], v.62, n.3, p.255-265, 1994.

SHAIN, I. Railway Traffic Control and Train Scheduling Based on Inter-Train Conflict Management. **Transportation Research Part B**, [s.l], v.33, p.511-534, 1999.

VERNAZZA, G., ZUNINO, R. A Distributed Intelligent Methodology for Railway Traffic Control. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. [s.l], v.39, n.3, p.263-270, 1990.

WEISS, G. (Ed.). **Multiagent Systems – A Modern Approach to Distribute Artificial Intelligent**. Cambridge: MIT Press, 1999. 619p.