

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

CONTROLE, COORDENAÇÃO E OTMIZAÇÃO EM
DESVIOS FÉRREOS: UMA ABORDAGEM COM SISTEMA
MULTIAGENTE REATIVO

Aluno: Osmar Betazzi Dordal

Orientador: Prof. Dr. Bráulio Coelho Ávila

Co-orientador: Prof. Dr. Edson Emílio Scalabrin

Curitiba
Agosto/2010

OSMAR BETAZZI DORDAL

**CONTROLE, COORDENAÇÃO E OTIMIZAÇÃO EM
DESVIOS FÉRREOS: UMA ABORDAGEM COM
SISTEMA MULTIAGENTE REATIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito para obtenção do título de mestre em Informática.

Curitiba
Agosto/2010

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

Dordal, Osmar Betazzi

D694c 2010 Controle, coordenação e otimização em desvios férreos: uma abordagem com sistema multiagente reativo / Osmar Bertazzi Dordal ; orientador, Bráulio Coelho Ávila ; co-orientador, Edson Emílio Scalabrin. – 2010.
vii, 110 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná,
Curitiba, 2010

Bibliografia: f. 107-110

1. Inteligência artificial. 2. Trens - Simulação por computador. 3. Sistemas inteligentes de controle. I. Ávila, Bráulio Coelho. II. Scalabrin, Edson Emílio. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática. IV. Título.

CDD 20. ed. – 006.3



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Informática

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 07/2010

Aos 30 dias do mês de agosto de 2010 realizou-se a sessão pública de Defesa da Dissertação “**Controle, Coordenação e Otimização em Desvios Féreos: uma Abordagem com Sistema Multiagente Reativo,**” apresentada pelo aluno **Osmar Betazzi Dordal** como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Bráulio Coelho Ávila
PUCPR (Orientador)

(assinatura)

Aprovado
(aprov/reprov.)

Prof. Dr. Edson Emílio Scalabrin
PUCPR

Aprovado

Prof. Dr. Fabrício Enembreck
PUCPR

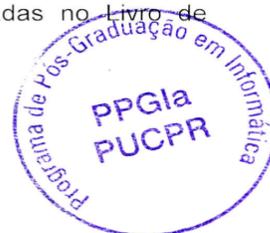
APROVADO

Prof. Dr. Maria Carolina Monard
USP

Aprovado

Conforme as normas regimentais do PPGLa e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado aprovado (aprovado/reprovado), segundo avaliação da maioria dos membros desta Banca Examinadora. Este resultado está condicionado ao cumprimento integral das solicitações da Banca Examinadora registradas no Livro de Defesas do programa.

Prof. Dr. Mauro Sérgio Pereira Fonseca
Diretor do Programa de Pós-Graduação em Informática



Dedicatória

Aos meus pais e esposa, incenti-
vadores e motivos pela busca
ao meu crescimento.

Agradecimentos

Á Deus, por ter me fornecido capacidade para desenvolver este trabalho e fazer escolhas corretas até o presente momento.

Aos meus pais, pelo esforço e dedicação para que eu pudesse chegar a esse objetivo.

A minha esposa Verônica, pela paciência e incentivo para a conclusão desta etapa em minha vida. Sem seu apoio, este sonho não seria concretizado.

Ao Dr. Wilson S. Moura, pela humanidade, ética e profissionalismo com que tratou toda a minha família. Pelo sucesso na realização de uma cirurgia de alto risco em minha mãe e pelas suas palavras de carinho e segurança em um momento tão delicado da minha vida.

Aos professores Dr. Bráulio Coelho Ávila e Dr. Edson Emílio Scalabrin pelas horas dedicadas à realização deste projeto. Em especial ao professor Bráulio, pela confiança nos resultados desse trabalho.

Aos demais colegas de laboratório, pelas idéias e colaborações para que este trabalho produzisse frutos e atingisse os objetivos propostos. Principalmente ao meu amigo André Pinz Borges que foi um grande incentivador e companheiro de laboratório.

E a todos que me ajudaram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado.

Á PUCPR e ao CNPq, pelos subsídios financeiros para a realização deste trabalho

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	SISTEMA FERROVIÁRIO	5
2.1.	Considerações Iniciais.....	5
2.2.	Via férrea.....	5
2.3.	Sistemas de sinalizações e métodos de condução	7
2.4.	Seção de Bloqueio	7
2.5.	Evolução dos controles de tráfego ferroviário.....	9
2.5.1.	Sinais multi-aspecto	10
2.5.2.	Automatic train protection –ATP	11
2.5.3.	Distance to-go.....	13
2.5.4.	On-Cabe signal	14
2.6.	Capacidade da via	14
2.7.	Seções de bloqueio móveis	15
2.8.	Sistemas de controle ferroviários mais utilizados	16
2.8.1.	Automatic train operation – ATO.....	17
2.8.2.	Automatic train supervision – ATS	17
2.8.3.	Automatic train control – ATC.....	17
2.8.4.	Communications based train control - CBTC	19
2.9.	Considerações Finais	21
3.	AGENTES.....	22
3.1.	Considerações Iniciais.....	22
3.2.	Agentes.....	23
3.3.	Sistema multiagente	24
3.4.	Sistemas multiagentes cognitivos e reativos	25
3.4.1.	Sistema multiagente cognitivo	25
3.4.2.	Sistema multiagente reativo	26
3.5.	Organização de uma sociedade de agentes	27
3.6.	Arquiteturas	28
3.6.1.	Arquitetura modular horizontal	29
3.6.2.	Arquitetura quadro-negro.....	30
3.6.3.	Arquitetura de subsumption	33
3.6.4.	Arquitetura de tarefas concorrentes	34
3.6.5.	Sistemas de produção.....	35
3.6.6.	Arquitetura reativa	37
3.7.	Trabalhos relacionados	38
3.8.	Considerações finais	40
4.	METODOLOGIA E RESULTADOS.....	41
4.1.	Considerações iniciais.....	41
4.2.	Arquitetura do sistema	41

4.3.	Condução de trens.....	43
4.3.1.	Cálculos de movimento.....	43
4.3.2.	Cálculos de consumo	48
4.3.3.	Cálculos de frenagem.....	49
4.3.4.	Cálculos auxiliares de coordenação.....	54
4.4.	Definição dos agentes	54
4.4.1.	Modelagem da arquitetura do sistema	55
4.4.2.	Organização dos agentes	56
4.4.3.	Competências dos agentes.....	57
4.5.	Arquitetura do agente.....	58
4.6.	Entrada de dados.....	60
4.6.1.	Origem e formato dos dados	61
4.6.2.	Mensagens.....	64
4.7.	Definição das regras (Comportamentos).....	68
4.7.1.	Atribuição das regras aos agentes.....	69
4.7.2.	Regras dos agentes de licença	69
4.7.3.	Regras dos agentes de trem.....	70
4.8.	Resultados	79
4.8.1.	Configurações dos trens	79
4.8.2.	Configurações da via	80
4.8.3.	Resultados das viagens simuladas com condução tradicional	80
4.8.4.	Resultados das viagens simuladas pelo sistema multiagente	92
4.8.5.	Comparação dos resultados.....	102
4.9.	Considerações finais	103
5.	CONCLUSÕES.....	104
5.1.	Resultados	105
5.2.	Trabalhos futuros.....	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Entrada ou saída de um desvio (Imagem Google Earth).....	6
Figura 2 – Aparelho de Mudança de Via (AMV) (PORTO, 2005).....	6
Figura 3 – Princípio básico de uma seção de bloqueio (RPC RAIL CONSULTING, 2010).....	8
Figura 4 – Interlocking (NEW YORK CITY SUBWAYS, 2010).	9
Figura 5 – Sinalização com quatro aspectos.	10
Figura 6 – Sinalização com quatro aspectos com alteração no decorrer da passagem de um trem.....	11
Figura 7 – Sistema <i>automatic train protection</i> com um bloco de segurança (<i>overlap</i>) (RPC RAIL CONSULTING, 2010).....	12
Figura 8 – Sistema <i>automatic train protection</i> e suas velocidades de entrada / saída em cada seção de bloqueio (RPC RAIL CONSULTING, 2010).	12
Figura 9 – Sistema <i>distance to-go</i> (RPC RAIL CONSULTING, 2010).....	13
Figura 10 – Método UCI CODE 406 para compressão de tempo de viagem (LANDEX, 2008).....	15
Figura 11 – Seções de bloqueio móveis (RPC RAIL CONSULTING, 2010).....	16
Figura 12 – Esquema do sistema <i>automatic train control</i> (RPC RAIL CONSULTING, 2010).....	18
Figura 13 – Esquema do sistema PTC (<i>Positive Train Control</i>) (HARTONG, 2009)...	20
Figura 14 – Interação de um agente com o ambiente e outros agentes. Figura adaptada de (FERBER, 1999).	24
Figura 15 – Agentes são agrupados em níveis, no qual o nível n pode ser considerado semelhante ao nível $n+1$ se cada agrupamento em n for considerado como um indivíduo em $n+1$. Este agrupamento pode se repetir em outros níveis posteriores. Figura adaptada de (FERBER, 1999).....	28
Figura 16 – Representação de um agente na arquitetura horizontal. Figura adaptada de (FERBER, 1999).....	29
Figura 17 – Componentes da arquitetura quadro-negro. Definida por (CORKILL, 2003).	31
Figura 18 – Modelo de agente definido por (OCCELLO, et al., 1994).....	32
Figura 19 – Modelo de agente definido por (HAYES-ROTH, 1990).....	32
Figura 20 – Arquitetura de subsunção (BROOKS, 1985).....	33
Figura 21 – Supressores e inibidores da arquitetura de subsunção (BROOKS, 1985)...	33
Figura 22 – Esquema de um agente baseado em uma arquitetura de tarefas concorrentes, no qual o seletor de tarefas escolhe a tarefa que apresenta o maior valor obtido por meio de uma função de avaliação. Figura adaptada de (FERBER, 1999).....	35
Figura 23 – Esquema de um agente baseado em sistema de produção. Figura adaptada de (FERBER, 1999).	36
Figura 24 – Arquitetura de um agente reativo genérico. Figura baseada em (WEISS, 1999).....	37
Figura 25 – Cenário de atuação dos agentes.	42
Figura 26 – Gráfico da força de um freio dinâmico (LOUMIET, et al., 2005).....	50
Figura 27 – Esquema do sistema de freio automático.	51
Figura 28 – Área de atuação e domínio dos agentes do sistema.	56
Figura 29 – Arquitetura de um agente de licença reativo.	59
Figura 30 – Arquitetura de um agente de trem reativo.	60
Figura 31 – Representação gráfica de um desvio descrito na Tabela 2.	62

Figura 32 – Diagrama de interação entre os agentes.	65
Figura 33 – Agente de licença e mensagens trocadas com os agentes de trem.	68
Figura 34 – Execução do agente de licença.	70
Figura 35 – Execução do agente de trem.	71
Figura 36 – Trecho utilizado pelos agentes.	73
Figura 37 – Trecho utilizado pelos agentes com diversas situações.	74
Figura 38 – Trecho utilizado pelos agentes com seus pontos de segurança calculados.	75
Figura 39 – Trecho de proximidade do desvio.	77
Figura 40 – Configuração da via férrea utilizada.	80
Figura 41 – Trecho utilizado para simulações com seções de bloqueio fixas (SBs).	81
Figura 42 – Simulação do pior caso entre os trens (tempos dos trens).	82
Figura 43 – Simulação do pior caso entre os trens (velocidades dos trens).	83
Figura 44 – Simulação do pior caso entre os trens (consumos dos trens).	84
Figura 45 – Simulação do pior caso entre os trens (consumos dos trens LTKB).	84
Figura 46 – Simulação do caso médio entre os trens (tempos dos trens).	85
Figura 47 – Simulação do caso médio entre os trens (velocidades dos trens).	86
Figura 48 – Simulação do caso médio entre os trens (consumos dos trens).	87
Figura 49 – Simulação do caso médio entre os trens (consumos dos trens LTKB).	88
Figura 50 – Simulação do melhor caso entre os trens (tempos dos trens).	89
Figura 51 – Simulação do melhor caso entre os trens (velocidades dos trens).	90
Figura 52 – Simulação do melhor caso entre os trens (consumos dos trens).	91
Figura 53 – Simulação do melhor caso entre os trens (consumos dos trens LTKB).	92
Figura 54 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (tempos dos trens).	93
Figura 55 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (velocidades dos trens).	94
Figura 56 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (consumos dos trens).	96
Figura 57 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (consumos dos trens LTKB). ...	96
Figura 58 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (tempos dos trens).	97
Figura 59 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (velocidades dos trens).	98
Figura 60 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (consumos dos trens).	99
Figura 61 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (consumos dos trens LTKB).	100
Figura 62 – Consumo médio (LTKB) x tempo total de cada viagem (horas).	101
Figura 63 – Comparação entre todas as simulações realizadas.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência e Consumo de uma Locomotiva Modelo C30.	44
Tabela 2 – Arquivo de descrição de via férrea.	62
Tabela 3 – Arquivo de configuração de uma locomotiva C30.	63
Tabela 4 – Arquivo de configuração referente a 14 vagões de carga idênticos.	64

RESUMO

O objetivo deste trabalho visa conduzir e coordenar trens em um trecho de via férrea contendo um desvio, onde trens envolvidos evitem paradas desnecessárias, que são as maiores causas do elevado consumo de combustível. O principal resultado foi a implementação de um sistema multiagente capaz de simular essa situação. Esse sistema foi proposto devido à sua capacidade de simular o mundo real. Nesse processo foram desenvolvidos agentes reativos capazes de perceber situações de risco no trecho, através de percepções, mensagens de coordenação e tomadas de decisão para que todos os trens envolvidos possam utilizar um desvio de forma a economizar tempo e consumo, evitando a ocorrência de paradas e colisões. As simulações do sistema proporcionaram resultados expressivos relativos à redução no consumo de combustível, no tempo de viagem e no esgotamento da capacidade do trecho de via férrea. As simulações foram realizadas com base na comparação entre técnicas de condução tradicionais e conduções realizadas pelo sistema multiagente.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Sistema Multiagente, Coordenação, Agentes Reativos, Condução de Trens

ABSTRACT

The aim of this paper is to conduct and coordinate trains on a stretch of rail containing a crossing loop, where the trains involved avoid unnecessary stops, which are major causes of high fuel consumption. The main result is the implementation of a multi-agent system able to simulate this situation. The system was proposed due to its ability to simulate the real world. In this process were developed reactive agents capable of perceiving risk situations in the rail stretch, through perceptions, messages for coordinating and decision making so that every train can use the crossing loops in order to save time and consumption, preventing the occurrence of stops and collisions. The simulations of the system provided significant results concerning the reduction in fuel consumption, travel time and depletion of the railway stretch. The simulations were based on a comparison between the traditional technique of driving with the driving of multi-agent system.

Keywords: Artificial Intelligence, Multi-Agents Systems, Coordination, Reactive Agents, Drive Trains.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente temas sobre a eficiência energética no transporte, principalmente de cargas, objetivo de várias pesquisas pelo mundo, grande parte destas vinculadas às formas de desenvolvimento e de construção de motores. Esses motores são capazes de obter o melhor rendimento, minimizando o consumo, visando à redução das emissões de gases poluentes na atmosfera e elevando a competitividade desse setor (CATERPILLAR, 2010).

Entretanto, uma das maiores causas de consumo de combustível em ferrovias está relacionada à forma de condução realizada pelos condutores (maquinistas). Empresas como América Latina Logística (ALL) realizam torneios como a Copa Diesel (TODESCHINI, 2009), sendo o campeão do torneio o condutor com menor consumo em um determinado período. Em geral, um condutor deve tomar ações com base em diversas informações advindas de sensores espalhados pela locomotiva, de sistemas embarcados e suas percepções visuais. Essas ações devem ser tal que o condutor reaja de forma eficiente para evitar consumos excessivos.

As ações tomadas pelos condutores são, em parte, proporcionais ao consumo de uma locomotiva. Entretanto, outra grande causa de consumo excessivo está relacionada às paradas que os trens efetuam no decorrer de uma viagem (PEREIRA, 2009). Essas paradas são realizadas para que os trens possam sincronizar os tempos de chegada nos desvios férreos, evitando a colisão entre trens que estão em sentido contrário em uma mesma via férrea singela.

Para evitar situações como os riscos de colisões e consumos excessivos, os sistemas embarcados das locomotivas são chamados de Computadores de Bordo de Locomotiva (CBL). A maior finalidade desse computador está relacionada em apresentar

dados em tempo real para auxiliar o condutor, por exemplo: o posicionamento do trem na via férrea; consumo; velocidade; tempo; restrições; entre outros. Porém, se o sistema embarcado for dotado de um sistema inteligente, este poderá otimizar a condução do maquinista, elevando o sistema de operacional para estratégico/autônomo. A existência de um sistema desse porte é essencial para atuar com um grande número de variáveis utilizadas na coordenação e condução de trens, melhorando também a utilização da via.

Segundo avaliação feita em 2009 pelo governo federal e pelos investidores privados do setor de transporte ferroviário de cargas, foi verificado que o modal ferroviário brasileiro está chegando próximo ao seu limite (MEDINA, 2009). Esse limite se aproxima devido ao ritmo acelerado do crescimento da economia brasileira e com a expansão do Produto Interno Bruto (PIB) que pode chegar a 7% em 2010, elevando o risco de evidenciar os gargalos do setor ferroviário (DIVICITY, 2010).

O Brasil, com seus 29 mil quilômetros de ferrovia construída, ainda permanece atrás de vários países, tais como: o Japão com 23 mil quilômetros de ferrovias; a Argentina com 34 mil; a Austrália com 41 mil; a Alemanha com 45 mil; a Índia com 63 mil; o Canadá com 64 mil; a China com 71 mil; a Rússia com 87 mil; e os Estados Unidos com aproximadamente 200 mil (ARAÚJO, 2010), considerando que alguns dos países possuem a capacidade de via maior tomando como base a proporção do seu território.

O setor ferroviário no País deve gerar R\$ 74 bilhões em investimentos até 2014, correspondendo a 270% do valor investido no período de 2004 a 2008. Desse investimento, cerca de R\$ 25 bilhões devem ser destinados ao transporte de cargas e expansão das ferrovias (INTELOG, 2009).

Outra preocupação com a expansão das ferrovias é relacionada ao consumo de combustível e emissões de poluentes. Nesse contexto, diversas pesquisas têm sido realizadas para melhorar a capacidade energética dos motores das locomotivas, e também a utilização de outras formas de combustíveis (PINTO, 2009).

Na busca em alcançar a maior eficiência energética em sistemas ferroviários, os riscos de esgotamento da capacidade das ferrovias e a preocupação cada vez maior com a emissão de gases poluentes são fontes de inúmeros estudos. Porém, esses estudos permanecem ainda pela busca de tais soluções, motivando o desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho resultou em um sistema de condução autônoma de trens capaz de obter eficiência energética relacionada à condução de trens e coordenação de

aproximação e tráfego em áreas de desvio. Para este fim, foram utilizadas técnicas de inteligência artificial na construção de um sistema multiagente capaz de simular o tráfego de trens em um trecho com um desvio de forma coordenada e econômica.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver técnicas computacionais para auxiliar no processo de tomada de decisão. Entretanto, um objetivo maior desse trabalho é descobrir formas de evitar o consumo relacionado às paradas, com isso foram propostas regras de condução e coordenação entre agentes. Desta forma, este trabalho compreendeu em estudar tais regras, com os objetivos específicos de:

- Realizar estudos detalhados sobre métodos de sinalizações e coordenações de trens em ferrovias;
- Criar regras que conduzam trens de forma segura;
- Criar regras que tornem tais conduções coordenadas evitando acidentes relacionado a colisões frontais e traseiras;
- Construção de um sistema que simule tais viagens utilizando as regras criadas, evitando assim, paradas desnecessárias obtendo também a economia de combustível e redução nos tempos totais das viagens.

A contribuição deste trabalho visou a criação de um simulador capaz de mostrar todos os benefícios relacionados à utilização de agentes de software para que interajam e coordenem os trens em viagens. Simuladoras são ferramentas cada vez mais utilizadas pelas empresas do ramo ferroviário, onde há necessidade de informações, tais como: consumo; tempo de viagens; esgotamento da capacidade da malha ferroviária entre outros são essenciais para o planejamento organizacional (FIRONI, et al., 2005).

O presente trabalho, além deste capítulo, está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os aspectos de uma via férrea e os componentes que a formam, bem como os sistemas de sinalização e métodos de condução ferroviária de forma cronológica, que vão desde os primórdios da ferrovia até os sistemas de controle de tráfego mais modernos. No Capítulo 3 são apresentados estudos sobre agentes de software e sistema multiagente, sendo eles capazes de simular o ambiente ferroviário, nos quais são evidenciados também os tipos de sistemas reativos e cognitivos, suas arquiteturas e trabalhos relacionados. A metodologia de resolução do problema é apresentada no Capítulo 4, bem como os cálculos e equações utilizadas, definições e arquiteturas dos agentes, as entradas de dados, as definições das regras de cada agente do sistema e os resultados.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e várias linhas de pesquisas que podem dar continuidade ao presente trabalho.

2. SISTEMA FERROVIÁRIO

2.1. Considerações Iniciais

O modal ferroviário de cargas foi relegado no Brasil por muitos anos. Apesar dos recursos utilizados pela iniciativa privada nas ferrovias do país, os gargalos que o setor enfrenta ainda causam muitos problemas que necessitam ser resolvidos, tais como: conflitos do tráfego ferroviário com veículos e pedestres; crescimento desordenado das cidades, impossibilitando manobras dos trens de carga; comprometimento do acesso aos portos pela inexistência de áreas capazes de atender à demanda atual e futura; invasões na faixa de domínio, a maior parte ocorrida na época de domínio estatal; e passagens de nível críticas, em média, uma a cada 2,3 quilômetros de ferrovia (GIAVINA-BIANCHI, 2009).

O sistema ferroviário necessita de muitas melhorias, pois até hoje a forma de sinalização e métodos de condução idealizados no início das ferrovias, ainda são de relativa utilização, principalmente no que se diz respeito às ferrovias brasileiras. Nesse capítulo são apresentadas algumas informações sobre aspectos da via férrea e alguns sistemas de sinalização e métodos de condução seguindo uma ordem cronológica de evolução.

2.2. Via férrea

A malha férrea, segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2010), compreende um conjunto de infra-estrutura de vias (ramais e troncos), terminais de transbordo, moegas, pátios de manobra, balanças e centros de controle operacional do

sistema ferroviário. O maior foco deste trabalho está relacionado à sub-trechos da malha chamados via férrea, que é formada por um conjunto de desvios e cruzamentos. Nesse trabalho, os esforços serão em um sub-trecho com apenas um desvio, como mostra a Figura 1.



Figura 1 – Entrada ou saída de um desvio (Imagem Google Earth).

O trecho de via férrea utilizado como exemplo é de uma via com uma quilometragem limitada, na qual está inserido um desvio formado por dois seletores, um de entrada e outro de saída, ambos chamados de aparelho de mudança de via (AMV), como mostra a Figura 2.

AMV – Aparelhos de mudança de via

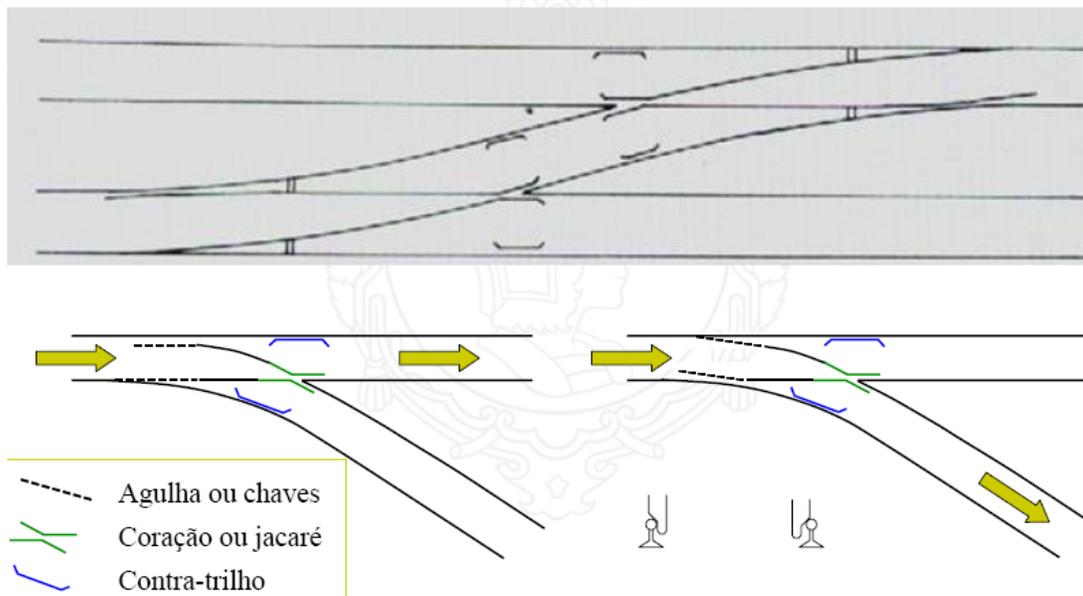


Figura 2 – Aparelho de Mudança de Via (AMV) (PORTO, 2005).

Na Figura 2 o aparelho de mudança de via é utilizado para um ou mais trens efetuarem a entrada ou não em um desvio, ou também para fazerem trocas de via quando o caso for um cruzamento. Um trem ao se aproximar de um aparelho de mudança de via deve permanecer em uma velocidade igual ou inferior a 15 km/h ; se essa velocidade não for obedecida poderá haver quebra em: uma das agulhas¹ ou ambas; ou no coração² também conhecido como jacaré. Em caso de ocorrência de uma dessas quebras, há um grande risco de descarrilamento de um trem (RPC RAIL CONSULTING, 2010). A obediência as regras de sinalização é um fator de grande importância nas ferrovias.

2.3. Sistemas de sinalizações e métodos de condução

A história das sinalizações ferroviárias remonta desde 1814 com a utilização da locomotiva de George Stephenson Steam, sendo as sinalizações feitas com gestos a mão. Logo em seguida foram utilizadas sinalizações com bandeiras nos períodos diurnos, lanternas nos períodos noturnos e em alguns casos homens montados a cavalo carregavam as bandeiras de sinalizações. Esse método foi utilizado nas ferrovias de Nova York até 1920, já sinalizações fixas foram utilizadas pela primeira vez em 1832 (GANGULY, 2010), e a partir desse período iniciaram-se formas mais seguras de sistemas de sinalização e condução de trens.

2.4. Seção de Bloqueio

O sistema de seções de bloqueios ou blocos fixos foi uma das primeiras formas de se evitar colisões entre trens, pois com a alta demanda de trens em uma mesma via era necessária; estas seções evitam situações onde trens ficariam muito próximos uns dos outros. Assim as seções de bloqueio tinham sinalização no seu início e fim, eram de tamanhos fixos e não era permitida a entrada de mais de um trem em cada bloco. Quando um trem adentrava em um bloco, esse bloco era fechado e somente após a saída do trem o sinal era liberado para a entrada de outro trem. Porém, como a demanda era cada vez maior, foram iniciadas permissões passivas de entrada de mais de um trem em determinadas seções de bloqueio (GANGULY, 2010). O princípio básico de uma seção de bloqueio é mostrado na Figura 3.

¹ Parte móvel do trilho que faz a alteração da direção das rodas do trem.

² Parte da linha férrea que faz o ângulo entre as duas direções do trilho.

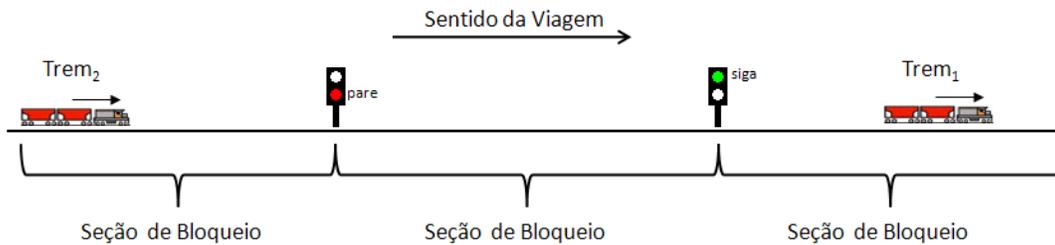


Figura 3 – Princípio básico de uma seção de bloqueio (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

A partir de 1851 foi introduzido o sistema de telégrafo ao longo das linhas férreas para verificar as posições dos trens. Assim, os trens que estavam entre as estações poderiam ser contabilizados, ou seja, em cada estação era prevista a quantidade de trens que estavam para sair e chegar. Porém, não havia ainda nenhum sistema de proteção para evitar colisões entre trens em uma mesma seção de bloqueio, pois mesmo com a informação do telégrafo os imprevistos entre as estações não poderiam ser informadas (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

Em 1872 foi concebido um circuito fechado que deu um grande impulso ao sistema de sinalização ferroviária. Por fim em 1911 foi possível a introdução de trens em linha singela³ com sentidos opostos.

Com a utilização de trens com sentidos opostos foi necessária a utilização do sistema de sinalização chamado *interlocking*. Esse sistema faz o bloqueio de partes da linha férrea principalmente em junções, desvios e cruzamentos para que não haja colisões frontais como mostra a Figura 4.

³ Trecho de linha férrea onde trens trafegam em sentidos opostos utilizando apenas desvios para evitar colisões frontais

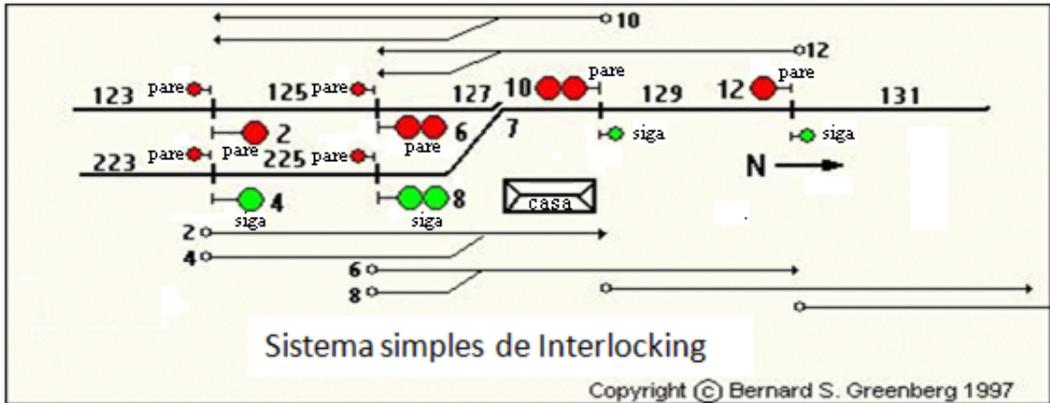


Figura 4 – Interlocking (NEW YORK CITY SUBWAYS, 2010).

Na Figura 4 é mostrado o esquema de *interlocking* hipoteticamente pequeno, sendo as linhas largas as linhas férreas, os semáforos simples e duplos maiores são os semáforos manuais controlados pelo operador localizado na “casa” e os sinais simples menores são sinais auxiliares ativados automaticamente. Os números entre 2 e 12 são os identificadores das chaves de mudança e as linhas finas são os efeitos que as mudanças dessas chaves provocam juntamente com o sentido desses efeitos (NEW YORK CITY SUBWAYS, 2010).

Na Figura 4 o trem que vem pela linha férrea no sentido da seção de bloqueio 223 para a seção de bloqueio 131 tem seu trajeto liberado, já as outras seções no sentido da seção 123 para a 131 estarão bloqueadas, e no sentido da seção 131 para a 123 ou da seção 131 para a 223 também estarão bloqueadas.

Esse sistema, apesar de ser uma forma de sinalização de segurança rudimentar, ainda é muito utilizado em alguns sistemas de controles automatizados atuais que serão apresentados posteriormente.

2.5. Evolução dos controles de tráfego ferroviário

As formas de sinalização ficaram por um bom tempo sem evolução, ou seja, foram feitas apenas algumas adequações e correções nos sistemas até então existentes. Os sistemas das próximas seções têm por finalidade melhorar a coordenação para as vias férreas e a segurança utilizando formas de comunicação mais avançadas. Alguns dos métodos apresentados nas seções anteriores serão discutidos novamente a seguir.

2.5.1. Sinais multi-aspecto

A sinalização utilizando aspectos foi idealizada juntamente com a evolução das seções de bloqueio, no qual sinais com cores diferentes forneciam informações aos maquinistas (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

A sinalização multi-aspecto consiste em se verificar as quantidades de cores utilizadas, ou seja, sinalização com dois aspectos sendo na cor vermelha parada imediata, e na cor verde liberado para seguir. Três aspectos incluem uma cor amarela de atenção, já a sinalização com quatro aspectos inclui ainda mais uma cor amarela de atenção, como mostra as Figuras 5 e 6.

Na sinalização com dois aspectos o trem recebe a luz vermelha indicando que ele deverá parar imediatamente antes do semáforo, pois há outro trem na seção de bloqueio seguinte. Porém, como cada vez mais os trens conseguiam desenvolver velocidades maiores, foi necessário a introdução da sinalização com três aspectos. Nessa sinalização o sinal na cor amarela indica que o trem poderá entrar nessa seção de bloqueio, mas deverá reduzir sua velocidade, pois na próxima seção o semáforo na cor vermelha indica a ocupação da próxima seção de bloqueio por outro trem.

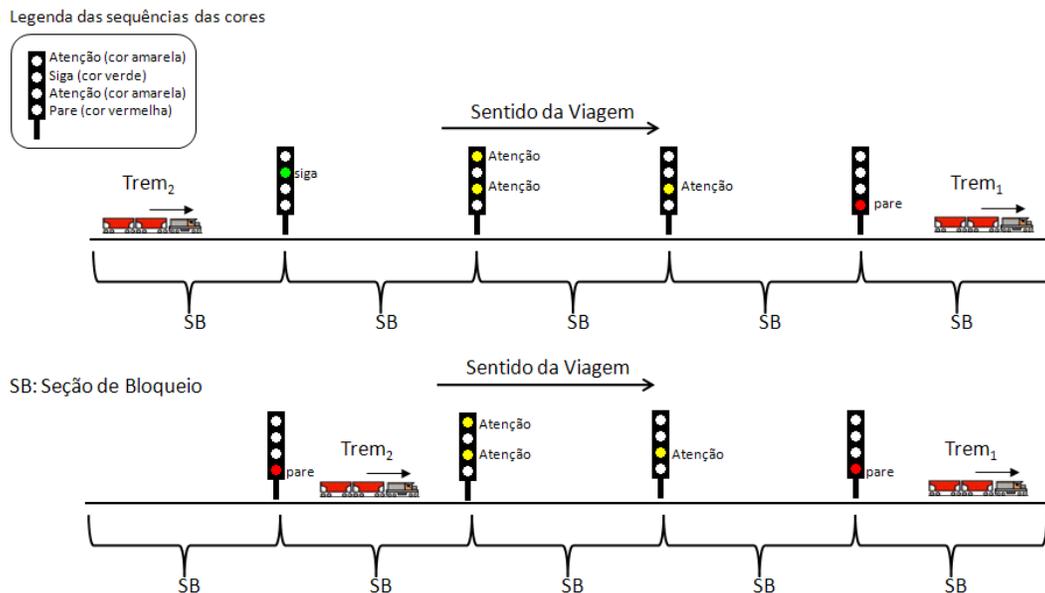


Figura 5 – Sinalização com quatro aspectos.

Na sinalização de quatro aspectos, no instante em que um trem encontra um semáforo na cor verde, pode-se concluir que logo à frente haverá pelo menos três seções

de bloqueio livres com as seguintes seqüências de sinais: uma na cor verde (siga); duas na cor amarela (atenção preliminar); uma na cor amarela (atenção redobrada, preparação para a parada); e finalmente uma na cor vermelha (parada imediata) como mostra as Figuras 5 e 6 (TRAINS MAGAZINE, 2010). Assim, uma sinalização com quatro aspectos proporcionam uma grande segurança com a introdução de dois blocos de atenção entre os trens. Porém, essa inserção de blocos adicionais entre os trens acaba por ocasionar a redução da capacidade da via férrea, pois os blocos que estarão em atenção preliminar e atenção redobradas não serão ocupados de forma otimizada.

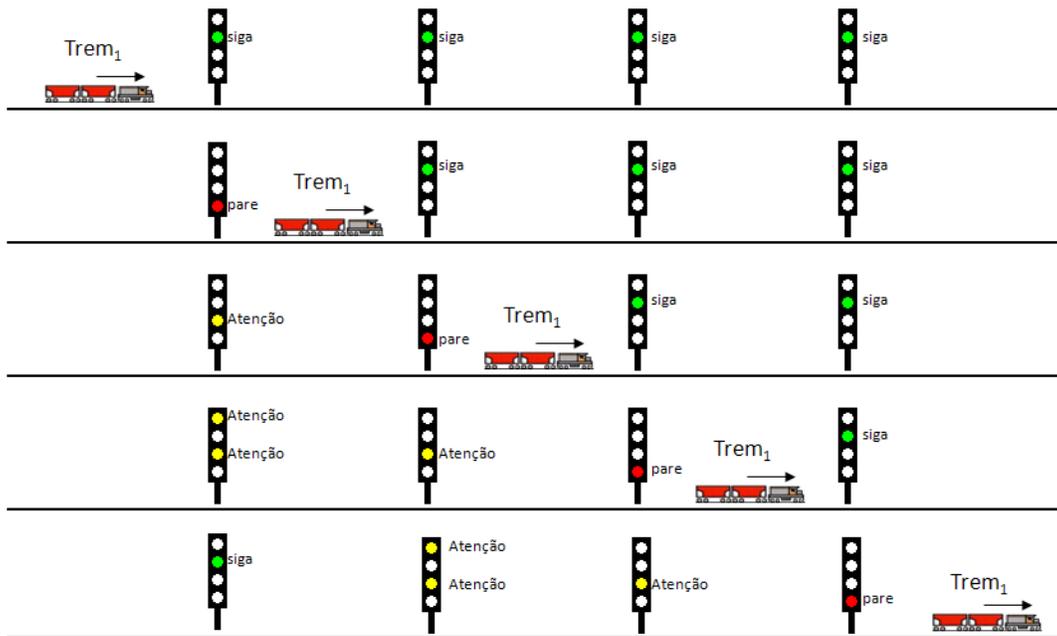


Figura 6 – Sinalização com quatro aspectos com alteração no decorrer da passagem de um trem.

2.5.2. Automatic train protection –ATP

O sistema *automatic train protection* foi incorporado aos sistemas ferroviários urbanos (*metrô*) no qual a demanda e a velocidade dos trens são maiores. Nesse sistema é feita uma contagem de seções de bloqueio com a introdução de mais um bloco adicional (*overlap*), que fica localizado entre dois sinais vermelhos. O *automatic train protection* proporciona uma distância segura de parada como mostra a Figura 7. Esse sistema com o *overlap* se parece muito com uma sinalização multi-aspecto com três aspectos.

Porém, se um trem invadir a seção de bloqueio de *overlap* ele deve estar com sua velocidade próxima à zero ou totalmente parado (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

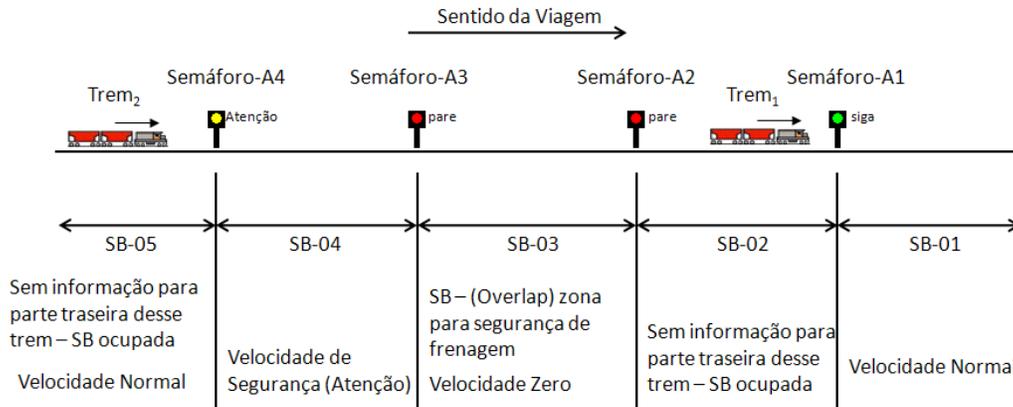


Figura 7 – Sistema automatic train protection com um bloco de segurança (overlap) (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

Na Figura 8 é ilustrada a versão atualizada do sistema *automatic train protection*, onde foram inseridas velocidades de entrada e de saída das seções de bloqueio.

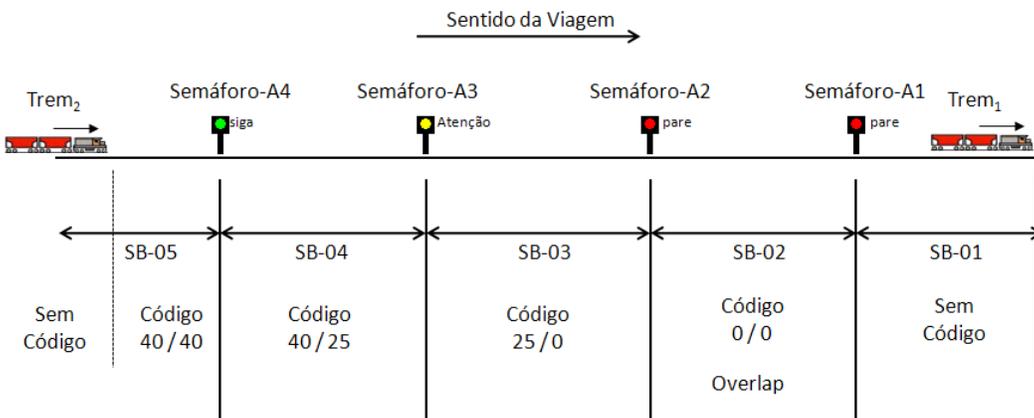


Figura 8 – Sistema automatic train protection e suas velocidades de entrada / saída em cada seção de bloqueio (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

Na Figura 8 são evidenciados os valores de velocidades nas seções de bloqueio (*velocidade de entrada / velocidade de saída*). Quando ocorre a invasão da seção de *overlap*, um sistema mecânico que pode ser uma chave localizada na lateral da via é responsável por ativar o freio de emergência do trem.

2.5.3. Distance to-go

A atualização do sistema *automatic train protection* foi desenvolvida para evitar os espaços perdidos nas seções de bloqueio de *overlap*. Com a utilização dessa seção de bloqueio seria possível ganhar cerca de 20% na capacidade da via. Para esse fim foi desenvolvido o sistema *distance to-go* que é um sistema com capacidade de realizar cálculos para detectar a distância de uma parada de emergência, com mais uma distância de margem de segurança, como mostra o esquema da Figura 9 (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

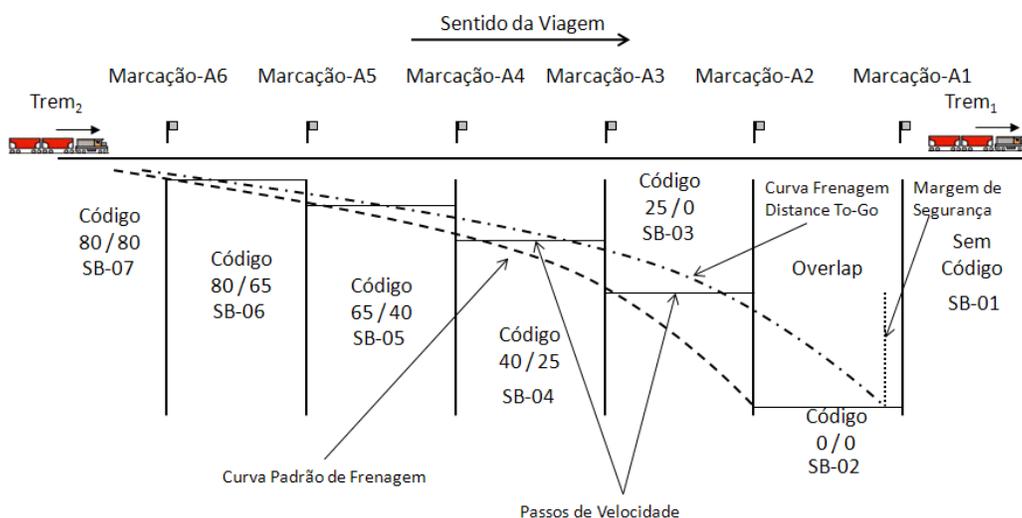


Figura 9 – Sistema *distance to-go* (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

Com o cálculo de distância de parada o sistema central assegura uma margem de distância de um trem para o outro. Diante disso a utilização das seções de bloqueio referentes ao sinal amarelo e a seção subsequente de *overlap* poderão ser utilizadas por outro trem que vem no mesmo sentido, evitando dinamicamente colisões traseiras entre dois ou mais trens. A Figura 9 mostra o princípio dessa solução (BRABAN, et al., 2005).

Essa forma de controle trouxe várias melhorias na utilização da capacidade da via, mas ainda não garantia vários outros aspectos como, por exemplo, a garantia do

itinerário⁴ dos trens, pois este método evitava apenas colisões traseiras, desprezando outros trens em sentido oposto em linhas singelas.

2.5.4. On-Cabe signal

O sistema on-cabe signal permitiu que informações pudessem ser passadas diretamente da central de controle para as cabines das locomotivas e também poderiam ser passadas por sensores especiais distribuídos ao longo das linhas férreas (PACIFIC SOUTHWEST RAILWAY MUSEUM, 2010).

Com esse método é possível evitar informações erradas para o maquinista, porém esse sistema ainda é passível de falhas na comunicação. Quando isso ocorre os maquinistas devem seguir a forma de condução mais restritiva, tendo que executar uma velocidade mais baixa seguindo rigorosamente as seções de bloqueio. Tanto o maquinista como a central devem reportar a volta da comunicação do sistema assim que possível (PACIFIC SOUTHWEST RAILWAY MUSEUM, 2010).

2.6. Capacidade da via

O termo capacidade da via é de extrema importância nas ferrovias, pois vários estudos são feitos para melhorar essa capacidade. Os sistemas que serão citados no decorrer desse capítulo persistem na tentativa de alcançar 100% da capacidade das vias férreas, principalmente nas vias singelas.

Na Europa a *Union Internationale des Chemins de Fer* desenvolveu um método chamado UCI CODE 406 (INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS, 2004), no qual mostra diversos estudos relacionados à melhoria da capacidade das vias férreas.

⁴ Relativo a caminhos: medidas itinerárias. Roteiro de uma viagem: estabelecer seu itinerário.

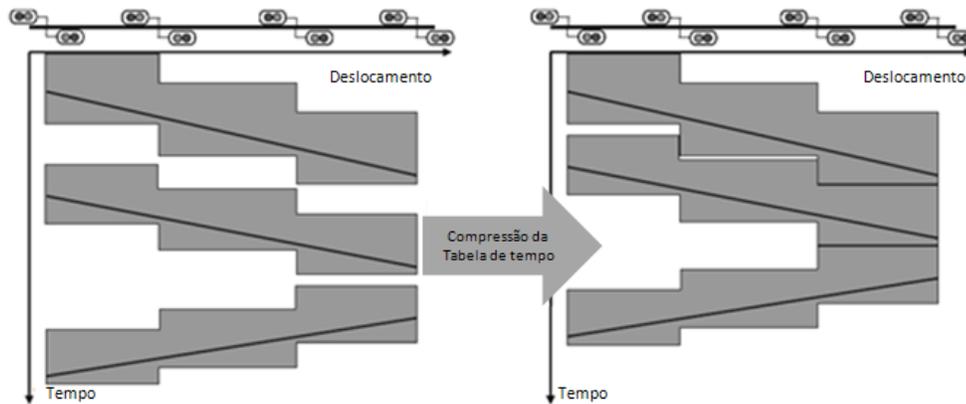


Figura 10 – Método UCI CODE 406 para compressão de tempo de viagem (LANDEX, 2008).

Um dos métodos utilizados no sistema UCI CODE 406, ilustrado na Figura 10, evidencia o consumo da infra-estrutura ferroviária que pode alcançar o máximo de sua capacidade de utilização com a compressão do tempo de utilização das seções de bloqueio que são ocupadas pelos trens (LANDEX, 2008). Dessa forma, quando são compactadas as tabelas de horários, são abertas possibilidades da inserção de um novo trem junto aos trens já existentes sem que haja alterações dos horários.

Outro importante estudo para melhorar a capacidade das vias férreas está relacionado à distância de parada. Os estudos são desenvolvidos para que cada vez mais se obtenha uma melhor precisão nos cálculos de parada, com isso as distâncias entre os trens podem ser cada vez mais reduzidas possibilitando a maior inserção de trens. Os estudos sobre tempos e distâncias de paradas podem ser vistos em (BENTLEY, et al., 2007).

2.7. Seções de bloqueio móveis

O método das seções móveis de bloqueio é uma forma de obter a totalidade da capacidade da via, pois tais seções de bloqueio seriam formadas pelos trens e não pela via férrea. Essas seções de bloqueio têm o formato de uma bolha de segurança em torno de cada trem. Ela é calculada com base na curva de frenagem de emergência de cada trem, sendo uma forma de utilização dinâmica do sistema *distance to-go* (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

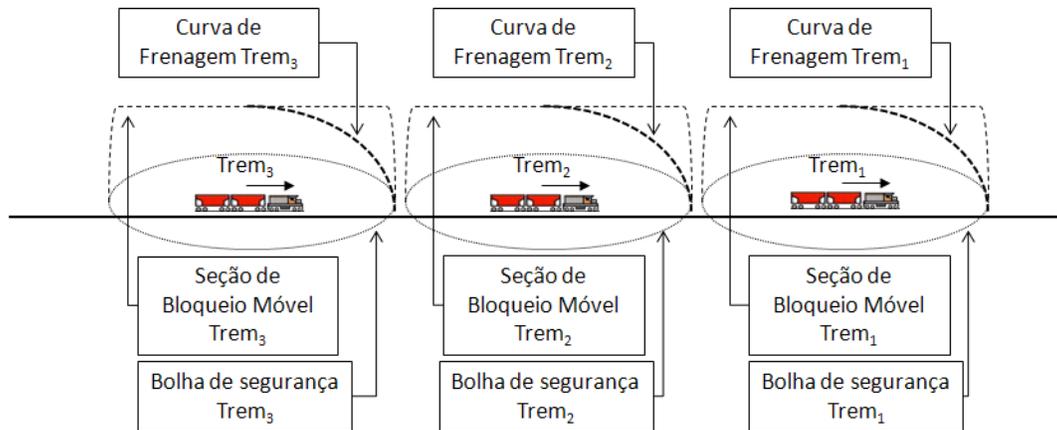


Figura 11 – Seções de bloqueio móveis (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

A seção móvel de bloqueio será então a soma da distância de parada de emergência do trem mais o seu comprimento, conseqüentemente a próxima seção móvel de bloqueio seria a mesma soma de valores do trem posterior, como mostra a Figura 11.

Com a utilização desse sistema ainda não era possível conseguir a capacidade total da via, pois entre a distância calculada de formação da bolha de segurança existia uma lacuna de via férrea não utilizada entre os trens, pelo fato de a curva de frenagem de emergência não ser feita com base no último vagão do trem posterior.

2.8. Sistemas de controle ferroviários mais utilizados

Os sistemas mais utilizados atualmente são sistemas que conseguem controles de forma automática no que diz respeito a paradas, controles de horários, operações em plataformas e assim por diante.

Nessa seção serão mostrados esses sistemas que são utilizados pelas empresas de transporte ferroviário. Essas empresas podem utilizar esses sistemas de forma unitária ou híbrida, ou seja, dependendo da necessidade da empresa controladora da via, ela pode utilizar apenas um ou mais sistemas (utilização de forma separada ou simultânea), como será mostrado a seguir.

2.8.1. Automatic train operation – ATO

No sistema *automatic train operation* são feitos controles sobre as chegadas e saídas das estações, e também sobre a distância exata de parada na plataforma. Esse sistema trabalha em conjunto com o *automatic train protection*.

A execução do *automatic train operation* é iniciada com a aproximação do trem à plataforma, tanto para paradas quanto para partidas. No momento de uma parada o *automatic train protection* verifica se a plataforma está livre para a chegada do trem. Se a plataforma estiver livre, então são iniciados os cálculos de parada pelo *automatic train operation* (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

Na parada realizada pelo *automatic train operation* os cálculos são atualizados várias vezes para uma parada precisa e suave. Após o trem estar parado, a utilização do *automatic train operation* é novamente requisitada para realizar a partida do trem da plataforma.

2.8.2. Automatic train supervision – ATS

O *automatic train supervision* é um sistema que se utiliza de uma tabela de tempo de chegada e saída dos trens. Ele é capaz também de atualizar os horários em tempo real para verificar se os trens estão dentro de seus itinerários. Ele pode sobrepor-se ao sistema *automatic train protection* em alguns ajustes dos trens nas seções de bloqueios, que na grande maioria das vezes utiliza o sistema de seções móveis de bloqueio (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

O *automatic train protection*, mesmo sendo projetado com a finalidade de manter o itinerário dos trens, ainda pode não ser capaz de atingir tal fim, pois sem uma forma de coordenação entre todos os trens, podem ocorrer situações de conflito em desvios, cruzamentos e pátios. Isso pode causar a propagação de inconsistências na tabela de tempo de toda uma malha férrea.

2.8.3. Automatic train control – ATC

O *automatic train control* foi concebido com a finalidade de automatizar funções a ponto de não haver a necessidade de intervenções humanas. Ele é um sistema que utiliza automaticamente outros três sistemas: *automatic train supervision*; *automatic train operation* e *automatic train protection*. O *automatic train control*, conforme mos-

tra a Figura 12, utiliza a seguinte sequência de execução. Primeiro para manter uma distância segura entre as seções de bloqueio, o *automatic train protection* entra em ação recebendo dados de sensores na via que indicam se há trens em seções de bloqueio subsequentes, e calculando velocidades limites para não ocasionar invasões de seções de bloqueio. Entretanto, essas informações são normalmente limitadas, e somente indicam ocupações de seções de bloqueio. Após isso, tais informações são enviadas para um nível acima, no qual o *automatic train supervision* verifica se com a velocidade executada os trens estão dentro da tabela de tempo inicial, ou seja, dentro dos seus itinerários. Por fim, o *automatic train operation* faz os cálculos de parada para uma estação ou pátio de manobra, onde essa parada é feita de forma precisa e suave.

No *automatic train control* a central de operações penaliza o maquinista quando por algum motivo ele invade uma seção de bloqueio não autorizada. Essa penalização resulta na ativação de um sistema chamado *automatic train stop* que por meio de sistemas computadorizados de bordo ativam os freios de emergência automaticamente até a parada total do trem e só depois que o maquinista fizer um relato sobre o que ocasionou a penalidade ele poderá voltar a movimentar o trem (DADDARIO, et al., 1976).

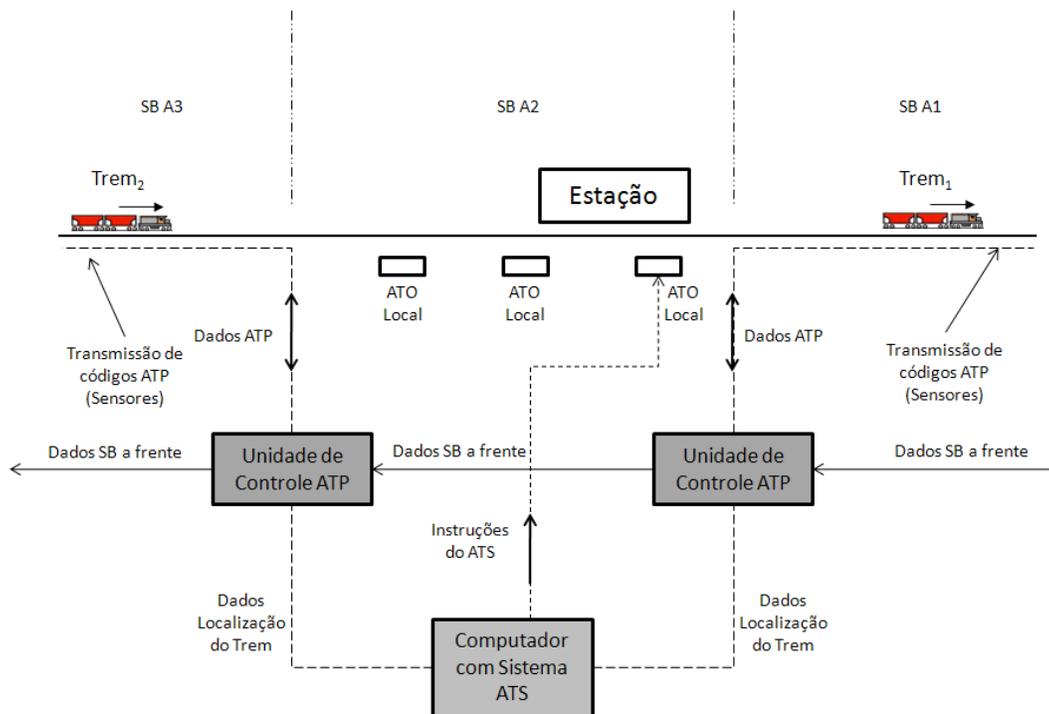


Figura 12 – Esquema do sistema *automatic train control* (RPC RAIL CONSULTING, 2010).

Existem muitas variações do sistema *automatic train control* em diversos países, sendo que cada país pode utilizar uma forma de combinação diferente para o sistema sendo que o princípio sempre será o mesmo.

O *automatic train control* ainda é utilizado em algumas ferrovias. Ele é um sistema composto à medida que ele trás na sua arquitetura a combinação dos sistemas: *automatic train operation*; *automatic train protection*; *automatic train supervision*; seções móveis de bloqueio; e *automatic train stop* (RPC RAIL CONSULTING, 2010). Alguns desses sistemas formadores do *automatic train control* são responsáveis em manter algumas falhas, sendo uma delas a falta de aproveitamento máximo da via férrea, como explicado sobre a falha no cálculo da bolha de segurança nas seções móveis de bloqueio na seção 2.7.

2.8.4. *Communications based train control - CBTC*

O sistema *communication based train control* foi implantado para evitar falhas do sistema *automatic train control*, tais como: colisões e baixa ocupação da via. Com isso algumas ferrovias americanas começaram a utilizar o sistema *communication based train control* para o seu controle do tráfego ferroviário (HARTONG, 2009).

O *communication based train control* é uma tecnologia que evita a utilização de elementos de via para controle de tráfego, tais como: os semáforos; seções de bloqueios e outros métodos de sinalização que por muitas vezes são vandalizados.

Esse sistema opera de forma bi-direcional entre os trens e as centrais de controle. Entre as suas principais características estão: o baixo custo de implantação; o baixo custo de manutenção; oferta de maior utilização da capacidade da via; a maior redução nos intervalos entre os trens; a maior segurança e melhor controle das operações ferroviárias. Dessa forma sua utilização foi sendo cada vez mais comum em todos os tipos de ferrovias metropolitanas, suburbanas, regionais e nacionais.

A ferrovia do Alasca utiliza o sistema *communication based train control* que por sua vez utiliza um sistema chamado GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) que é uma forma de navegação baseada no sistema de GPS (*Global Positioning by Satellite*); sistemas semelhantes estão sendo desenvolvidos na Austrália e no Brasil. Na Europa uma série de ensaios está sendo realizada para a utilização de GNSS (RPC RAIL CONSULTING, 2010). O *communication based train control* tem como funcionalidade todas as outras relacionadas aos sistemas anteriores de forma a não utilizar

meios físicos necessários aos sistemas anteriores, pois sua comunicação é realizada por transmissão via satélite.

O sistema *communication based train control* com a evolução tecnológica de rastreamento via satélite tem sido fonte de excelentes sistemas de condução de trens, de forma a melhorar o tempo e a qualidade das informações que podem ser enviadas a sistemas autônomos de condução de trens.

O *communication based train control* devido a algumas alterações na sua forma de comunicação, pode também ser conhecido pelos nomes *positive train control* (PTC), ou *wireless positive train control* (WPTC) que nada mais são que variações do sistema, no qual são inseridas algumas formas diferentes ou melhorias em termos de sistemas de comunicação (HARTONG, 2009).

O sistema *positive train control* utiliza ao mesmo tempo várias formas de comunicação sem fio, possuindo no próprio trem, comunicadores capazes de relatar situações como: localização exata da traseira do trem pelo sistema de final de trem (*end of train*), que também informa quando há ocorrência de um possível desacoplamento do trem; e a intercomunicação entre locomotivas de um trem com tração combinada, ou seja, mais de uma locomotiva no mesmo trem como mostra a Figura 13.

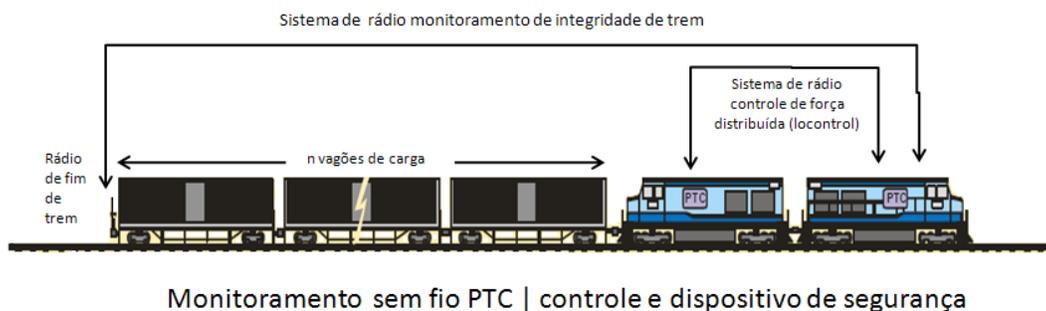


Figura 13 – Esquema do sistema PTC (*Positive Train Control*) (HARTONG, 2009).

No *positive train control* é feito o monitoramento de vários trens ao mesmo tempo, possuindo a capacidade de se comunicar e localizar os trens em tempo real e a qualquer velocidade. O sistema de fim de trem instalado no último vagão possui a capacidade de informar se houve algum desengate e também a posição do último vagão. Assim, o *positive train control* tem a informação completa da posição de cada vagão do trem e esse sistema é o que há de mais moderno nos meios de transporte ferroviários.

Um estudo mais aprofundado pode ser visto em *Secure Communications Based Train Control Operations* (HARTONG, 2009).

O sistema *communication based train control* e sua variante *positive train control* são os sistemas de tecnologia mais avançada utilizados atualmente, sendo cada vez mais implantados nas ferrovias. Assim, como os outros sistemas anteriores ele está em constante evolução, juntamente com as evoluções dos sistemas de posicionamento via satélite e dos meios de comunicação terrestres.

2.9.Considerações Finais

Nesse capítulo foram descritos vários sistemas de condução e sinalização utilizados em ferrovias, assim como aspectos da via férrea que são utilizados em um desvio. Porém, com as constantes evoluções dos trens e ferrovias, cada vez mais os sistemas de condução e sinalização necessitam de atualizações que venham melhorar cada vez mais a capacidade total de utilização das vias férreas, podendo evitar a ociosidade de trens que ficam parados à espera de outros trens, elevando cada vez mais os custos e riscos da ferrovia.

Esse trabalho vem possibilitar que sistemas de inteligência artificial formados por agentes de software, possam trabalhar em conjunto com as tecnologias atuais utilizadas nas ferrovias, para que trens possam ser conduzidos de forma inteligente reduzindo cada vez mais os custos com combustíveis e acidentes.

No próximo capítulo serão descritos alguns estudos na área de inteligência artificial que podem ser vinculados aos meios de transporte ferroviário.

3. AGENTES

3.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentada uma introdução sobre agentes e sistema multiagente. Agentes são utilizados neste trabalho para simular um ou mais trens que trafegam em sentidos contrários em uma linha férrea singela, fazendo a coordenação em um desvio, evitando colisões e paradas desnecessárias. Ao longo deste capítulo serão revisados os principais conceitos sobre agentes e sistema multiagente, suas arquiteturas e infraestruturas.

Agentes e sistema multiagente consistem em uma nova e promissora tecnologia de informação desenvolvida especificamente para solucionar problemas de alocação de recursos que são caracterizados por mudanças frequentes e incertas de um ambiente (WOOLDRIDGE, 2002).

O processo de interação se iniciou entre humanos e máquinas, com a evolução das máquinas e estudos relacionados a agentes de software, foi possível que sistemas controlassem o comportamento de máquinas de forma mais inteligente (SEARLE, 1980). Atualmente a interação entre agentes de software, computadores e veículos motorizados vem sendo cada vez mais fontes de pesquisas mundiais, principalmente pela busca nas reduções de consumo e conseqüentemente a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa e a potencializar o cumprimento dos itinerários com maior eficiência.

3.2. Agentes

O conceito de agentes é abordado de diversas formas, por vários autores, no qual cada variação é ajustada ao interesse de cada um. Na literatura são conhecidas várias formas de se definir um agente, porém a grande maioria leva em conta que um agente é uma espécie de entidade construída para habitar um ambiente e que nesse ambiente seja capaz de desenvolver a resolução de um problema de forma inteligente e autônoma, focando no objetivo para o qual ele foi projetado (WOOLDRIDGE, 2002).

Segundo (FERBER, 1999), agentes são entidades que podem atuar em ambientes virtuais ou físicos, ou seja, sua atuação pode ser apenas inserida em um software de simulação (virtual), ou em um ambiente físico, como: agentes situados em robôs de exploração, aeronaves e assim por diante.

Agentes podem ter a capacidade de se comunicarem com um ou mais agentes de forma direta, sendo essa comunicação feita na forma de troca de mensagens ou de alterações no ambiente em que estão inseridos. Podem ainda ter a capacidade de tomar decisões de forma otimizada para satisfazer seu conjunto de objetivos, e/ou satisfazer funções de objetivos mútuos. São entidades capazes de alcançar seus objetivos, perceber o ambiente onde estão inseridos, mas de forma limitada, pois podem ter essa percepção advinda de sensores que lhe informam apenas as informações de uma área ou de um ponto a sua frente.

Agentes são capazes de obter uma representação parcial do ambiente no qual estão inseridos, possuem a capacidade de prestar serviços específicos dentro de uma sociedade agentes, podem ser capazes de se reproduzirem, possibilitando sua clonagem para resolver um problema de forma distribuída para se comportarem com base no seu objetivo pré-estabelecido, utilizando para isso recursos implícitos, diante de suas percepções, representações e informações recebidas em forma de comunicação.

Assim o objetivo de um agente é interagir com um ambiente, coletando informações e sendo capaz de interpretá-las e/ou armazená-las para sua tomada de decisão para alcançar o seu objetivo.

3.3. Sistema multiagente

Um sistema multiagente é um sistema computacional no qual dois ou mais agentes interagem ou trabalham juntos num conjunto de tarefas, ou satisfazem um conjunto de objetos a que são propostos (LESSER, 1999). O ambiente pode ser aberto ou fechado, pode ter um número fixo ou variável de agentes, podem ser heterogêneos ou homogêneos, colaborar ou competir, entre outros.

Pode-se observar que, para o desempenho de suas ações, alguns agentes deverão comunicar-se para manter suas crenças coerentes e para cooperarem em tarefas nas quais as suas informações não são suficientes para uma decisão de forma isolada, mas satisfatórias de forma combinada. A idéia principal em um sistema multiagente é que um comportamento global inteligente pode ser alcançado a partir do comportamento individual dos agentes, não sendo necessário que cada agente seja individualmente inteligente. Um sistema multiagente possui o objetivo de agir sobre problemas mais complexos, realistas e de grande escala, indo além da capacidade de um único agente. A capacidade de um agente é limitada pelo seu conhecimento próprio, pelos seus recursos estruturais, e pela sua perspectiva (SYKARA, 1998). Contudo, a troca de informações entre os agentes de uma sociedade torna o sistema resultado num sistema multiagente mais robusto.

A Figura 14 ilustra o conceito de um sistema multiagente.

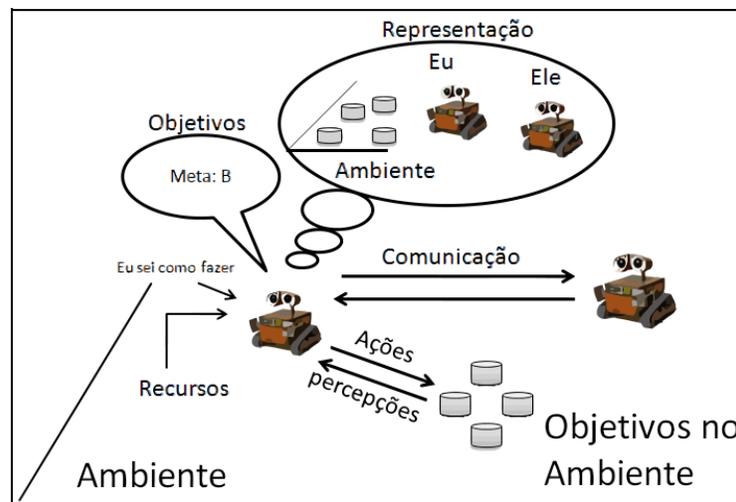


Figura 14 – Interação de um agente com o ambiente e outros agentes. Figura adaptada de (FERBER, 1999).

Segundo (FERBER, 1999), o termo sistema multiagente é atribuído a um sistema que compreende um ambiente de espaço E , onde E geralmente é de um tamanho definido. Nesse espaço E existe um conjunto de objetos O , que são passivos, podem ser percebidos, criados, destruídos e modificados pelos Agentes, que por sua vez formam um conjunto A , sendo esse um conjunto específico de entidades ativas do sistema. Um conjunto de relações R , que são ligações entre objetos do conjunto A e objetos do conjunto O e também entre agentes do conjunto A . Um conjunto de operações Op possibilita que agentes do conjunto A possam: perceber; produzir; consumir; transformar; e manipular objetos de O .

Operações com a finalidade de exercer a forma de tentativas de reações para o ambiente e suas possíveis modificações são configuradas como leis universais do sistema.

Agentes podem ser entidades de extrema simplicidade (agentes reativos) e com certa inteligência implícita. Eles são capazes de solucionar problemas de forma autônoma com seus próprios recursos. Tais problemas são advindos do ambiente em que eles estão inseridos e suas percepções das modificações do mesmo (FERBER, 1999).

3.4. Sistemas multiagentes cognitivos e reativos

Um sistema multiagente pode ser caracterizado basicamente em duas classes. A primeira denomina-se sistema multiagente cognitivo, que trabalha com um número menor de agentes capazes de realizar tarefas mais complexas, devida a própria complexidade do agente e sua base de conhecimento individual. A segunda abordagem, denominada sistema multiagente reativo, trabalha com o desenvolvimento de sistemas que utilizam um grande número de agentes mais simples para a resolução de um determinado problema (SHEN, et al., 2001).

3.4.1. Sistema multiagente cognitivo

Também chamados de agentes deliberativos, os agentes de um sistema multiagente cognitivo possuem um conhecimento explícito do ambiente no qual estão inseridos, se utilizam de conhecimentos sofisticados, possuem certas experiências embutidas, metas e planos a serem cumpridos entre outros. Além do mais, seu mecanismo de funcionamento deve fomentar a interação para viabilizar a cooperação com outros agentes.

Vários tipos de agentes cognitivos têm sido propostos. Alguns são simples e prezam pela autonomia e a cooperação, e outros apresentam grande complexidade e são utilizados em sistemas cooperativos ou de aprendizagem.

Um sistema multiagente cognitivo é baseado na organização da sociedade humana como grupos, hierarquias e mercados. Segundo (FERBER, 1999), as principais características dos agentes de um sistema multiagente cognitivo são as seguintes:

- Representação explícita do ambiente e dos outros agentes da sociedade;
- Podem manter um histórico das interações e ações passadas e, graças a esta memória, são capazes de planejar suas ações futuras;
- Seu sistema de percepção permite examinar o ambiente, e o de comunicação permite a troca de mensagens entre agentes. A comunicação entre agentes é realizada de modo direto por meio do envio e recebimento de mensagens;
- Seu mecanismo de controle é deliberativo. Os agentes cognitivos raciocinam e decidem em conjunto sobre quais ações devem ser executadas, que planos seguir e que objetivos devem alcançar;
- Considerando a última afirmação, os modelos de organização do sistema multiagente cognitivo são modelos sociológicos como as organizações humanas;
- Um sistema multiagente cognitivo contém usualmente poucos agentes que no máximo são da ordem de algumas dezenas.

Um sistema multiagente cognitivo será mais complexo que um sistema multiagente reativo, essa complexidade leva em conta sua natureza “intencional”, isto é: eles possuem planos e objetivos explícitos que lhes permitem uma interação melhor com os outros agentes e o seu ambiente.

3.4.2. Sistema multiagente reativo

São agentes mais simples capazes de responder mais rapidamente a estímulos, também foram propostos para utilização em ambientes no qual os agentes com planejamento não eram eficazes devido ao tempo limitado de resposta disponível. O sistema multiagente mais conhecido foi idealizado por David Chapman, demonstrando que em muitas circunstâncias o processo de planejamento anterior a ação não era determinante para a melhor solução do problema (CHAPMAN, 1987). O problema relacionado a essa forma de ação por meio de agentes simples levou a pesquisas sobre outras formas de

atuação em ambientes de tempo limitado, no qual um dos críticos mais notável foi Rodney Brooks, que em uma série de trabalhos traçou um programa de pesquisa conhecida por Inteligência Artificial comportamental, reativa, ou situada (JENNINGS, et al., 1998).

Agentes reativos são baseados na organização biológica como formigas, abelhas etc. O funcionamento desse tipo de agentes é baseado na forma de (estímulo / resposta). Suas principais características são (FERBER, 1999):

- Não há representação explícita do conhecimento: o conhecimento dos agentes é implícito baseado em suas regras de comportamento e sua manifestação se externa por meio do seu comportamento e dos demais agentes;
- Não há representação do ambiente: o comportamento (resposta) de cada agente é baseado no que ele percebe (estímulo) a cada instante. Não há uma representação interna explícita do ambiente;
- Não há memória das ações: os agentes reativos não mantêm nenhum tipo de histórico de suas ações, ou seja, o resultado de uma determinada ação passada não influencia diretamente na decisão de uma ação futura;
- Organização etológica: a forma de organização do sistema multiagente reativo é similar à observada por animais que vivem em grandes comunidades;
- Grande número de membros: em geral, o sistema multiagente reativo possui um grande número de agentes, com populações que podem chegar à ordem de milhares de membros.
- Comunicação e tomada de decisão.

Os agentes reativos não possuem representação do seu ambiente. Suas reações dependem basicamente das percepções do ambiente. Os modelos de sistema multiagente reativo utilizam-se da interação entre agentes, no qual cada agente possuindo seus próprios objetivos individuais solucionam um problema ou objetivo. Seus comportamentos são representados geralmente por um conjunto de regras (FERBER, 1999).

3.5. Organização de uma sociedade de agentes

No conceito de organização, é possível integrar o conceito de agentes a sistema multiagente. Sendo que um agente não corresponde apenas a um indivíduo, mas, sim,

um conjunto de componentes. Analogamente, um sistema multiagente é considerado como um conjunto de agentes formando um sistema unitário (FERBER, 1999).

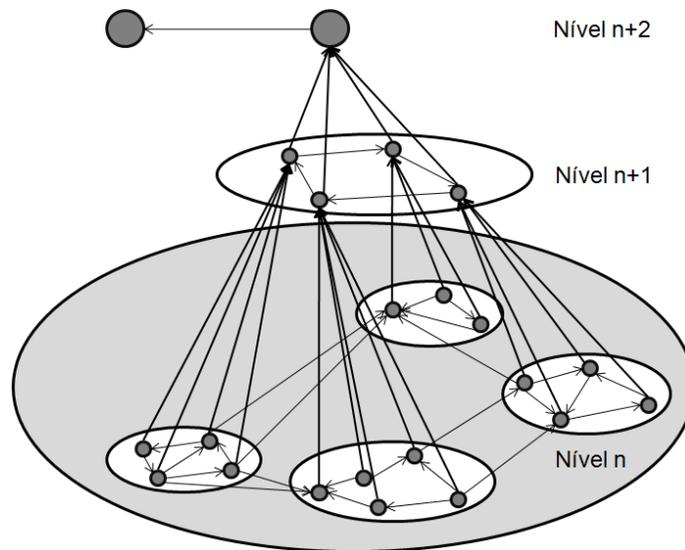


Figura 15 – Agentes são agrupados em níveis, no qual o nível n pode ser considerado semelhante ao nível $n+1$ se cada agrupamento em n for considerado como um indivíduo em $n+1$. Este agrupamento pode se repetir em outros níveis posteriores. Figura adaptada de (FERBER, 1999).

Uma organização pode ser definida como sendo um conjunto de componentes ou indivíduos que unidos formam uma única entidade ou um sistema, com capacidades de aprender tanto no nível de componentes como de indivíduos. Possuem ligações inter-relacionais que podem unir elementos, acontecimentos ou indivíduos a fim de se tornar um único componente. Com isso é possível que um indivíduo ou um sistema venha a ser um conjunto fortemente confiável e durável por mais que possam ocorrer rompimentos dessas relações (MORIN, 1977).

Assim, o acoplamento de vários agentes, sendo cada um desses um “solucionador” de problemas, constitui uma entidade mais forte capaz de solucionar um problema maior.

3.6.Arquiteturas

Uma arquitetura de agentes é importante para descrever a forma de implementação com relação às propriedades e estruturas, bem como serão as interações entre seus módulos para garantir uma forma ideal de funcionalidade.

Segundo (FERBER, 1999), na arquitetura de agentes encontramos parâmetros que são válidos na análise da forma da organização de entidades artificiais. Nesta análise são verificados elementos tais como: os seus tipos de abordagens, as suas estruturas de subordinação, a forma de construção de suas arquiteturas, etc. Dessa forma são descritas algumas arquiteturas, sendo elas: arquitetura modular horizontal, arquitetura quadro-negro, arquitetura subsunção, arquitetura de tarefas concorrentes, sistemas de produção e arquitetura reativa.

3.6.1. *Arquitetura modular horizontal*

A arquitetura modular horizontal é a forma mais difundida, tanto para trabalhos teóricos como práticos. Muito utilizada para a estrutura de agentes cognitivos, no qual a base de relacionamento é feita por meio de módulos horizontais com ligações pré-existentes. Seu fluxo de dados faz o caminho ascendente, partindo da percepção do ambiente pelos sensores do agente e depois descendente, finalizando no realizador da tarefa selecionada para atuação no ambiente. A base dessa arquitetura pode ser vista na Figura 16 (FERBER, 1999).

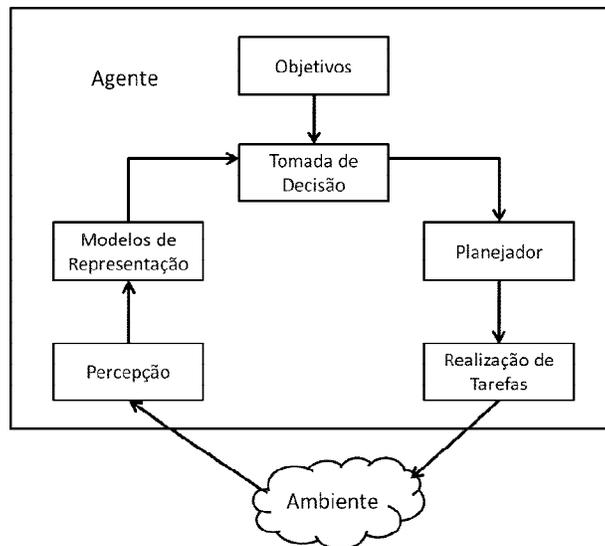


Figura 16 – Representação de um agente na arquitetura horizontal. Figura adaptada de (FERBER, 1999).

Esta arquitetura define um conjunto de módulos onde cada um executa uma rotina com funções específicas de forma horizontal. Os módulos mais utilizados estão relacionados abaixo:

- de perspectivas e as funções motoras, caso seja necessário;
- de envio e interpretações de comunicação;
- de base de crenças e modelo de compreensão do ambiente e de outros agentes;
- de gestão de obrigações/engajamentos;
- de domínio das competências e experiências;
- de gestão de metas e tomada de decisões; e
- de planejamento das ações entre outros.

Em Drogoul e Ferber (1994) foi proposto um sistema chamado MANTA, que utiliza camadas horizontais, e para cada tarefa concorrente utilizava uma atribuição de ativação. Este nível de ativação a_i de uma tarefa i é calculado pela seguinte expressão:

$$a_i = \frac{w_i(t)}{\sum_{j=1}^n w_j(t)} x_i(t) \quad (1)$$

Onde, $w_i(t)$ é o peso da tarefa t , x_i a intensidade do estímulo. A tarefa a_i é executada se for superior a um determinado limiar. Para selecionar tais funções, Brooks propôs uma arquitetura de subsunção que será mostrada mais a frente nesse capítulo.

3.6.2. Arquitetura quadro-negro

Os sistemas baseados na arquitetura quadro-negro foram desenvolvidos na década de 1970 para resolução de problemas complexos na interpretação de sinais do sistema chamado Hearsay-II (ERMAN, et al., 1980) (LESSER, et al., 1977). Desde a concepção deste tipo de estrutura, a arquitetura foi vista como uma metodologia importante para soluções de problemas complexos e com um potencial de utilização em grande escala em várias áreas de aplicações em problemas semi-estruturados (CORKILL, 2003). Também a arquitetura quadro-negro é de ampla utilização para sistemas multiagente cognitivos e foi inicialmente difundida no âmbito da inteligência artificial clássica

ca. Esta arquitetura é baseada numa divisão de módulos independentes, que são distribuídos de forma que não haja comunicação direta entre eles. Apenas sendo feitas a interação entre os agentes (ou fontes de conhecimentos) por meio do compartilhamento de dados por meio de um quadro-negro e de um mecanismo de controle.

Em outras palavras, as fontes de conhecimentos são módulos independentes nos quais estão contidos conhecimentos para uma possível solução de problemas. Sua interação é de forma anônima, pois não interagem diretamente uns com os outros. O quadro-negro por sua vez é uma forma global de compartilhamento de informações, onde cada fonte de conhecimento insere e recupera informações de forma parcial. Essas interações existentes são gerenciadas pelo módulo de controle, onde são feitas as coordenações de escrita e leitura de dados no quadro-negro (CORKILL, 2003), Na Figura 17 pode ser vista essa arquitetura.

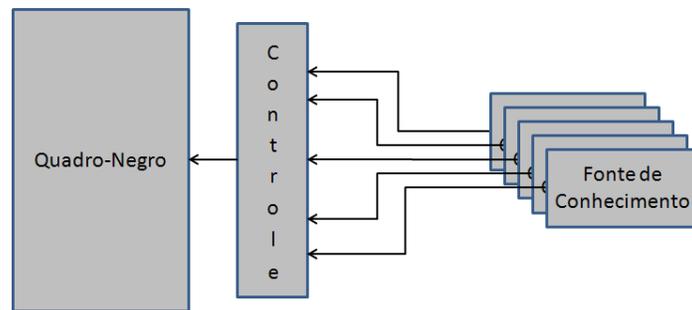


Figura 17 – Componentes da arquitetura quadro-negro. Definida por (CORKILL, 2003).

Nas Figuras 18 e 19 são mostrados dois modelos de agentes que utilizam formas de raciocínio baseada na arquitetura quadro-negro, tendo os modelos necessitam essencial de uma representação do conhecimento: estados mentais existentes (planos e ações); e o ambiente. Também são implementados mecanismos como: raciocínio ou inferência; planejamento; execução de um plano; incorporação de um novo evento no mecanismo de raciocínio; e a capacidade de adaptação ao plano.

As Figuras 18 e 19 representam modelos de agentes que utilizam a arquitetura quadro-negro e que se utilizam das capacidades reativas e cognitivas, sendo capazes de realizar tarefas como percepção/cognição/ação.

Na Figura 18 a percepção do agente se dá pelo sensor de entrada (*sensory input*), e a execução gera uma saída (*action*). O núcleo do agente é representado pelo módulo que contém o modelo do mundo (*world model*), dotado de regras para compreen-

são sobre o ambiente em que o agente opera e também com relação a seu próprio estado mental. Consequentemente o estado mental de outro agente que não é apresentado de forma explícita na Figura 18. Por fim, para que a capacidade reativa do agente seja proporcionada, o processo de avaliação examina de modo contínuo o modelo do mundo. Assim, o agente poderá reagir na situação devida e também decidir quais ações devem ser executadas.

Na Figura 19 é mostrada uma arquitetura de quadro-negro estendida denominada BB1. Ela define uma base importante para sistemas adaptativos inteligentes (HAYES-ROTH, 1985). Inicialmente uma interface de comunicação faz a transmissão de dados entre entidades externas, colocando tais dados em uma fila na memória global do sistema. No ciclo básico de execução os eventos de entrada podem desencadear reações de saída, sendo a percepção/cognição/ação concorrentemente assíncronas.

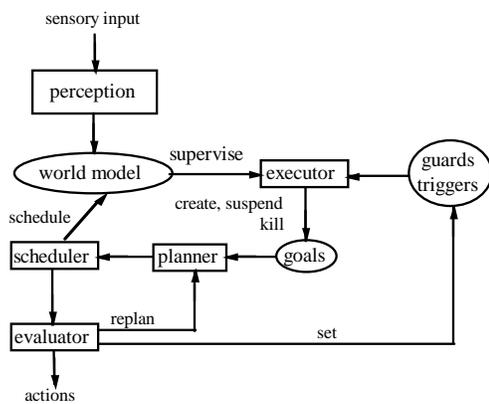


Figura 18 – Modelo de agente definido por (OCCELLO, et al., 1994).

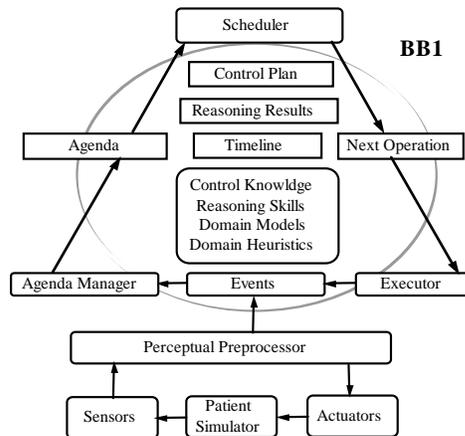


Figura 19 – Modelo de agente definido por (HAYES-ROTH, 1990).

Em seguida pré-processadores de percepção usam de forma dinâmica controles para evitar uma sobrecarga sensorial do sistema, escalonando eventos que são ou não relevantes para ele. Nesse ponto são organizadas todas as observações, expectativas e intenções geradas pelo agente de forma temporal (*timeline*). Finalmente, o ciclo de execução básica tornasse um ciclo satisfatório para o agente, no qual possivelmente não foram necessárias as execuções de todas as tarefas, e sim a que foi mais relevante, evitando ações que não fossem ideais. Dessa forma o sistema BB1 executa ciclos de alta qualidade em tempo de execução, mesmo com altas taxas de variações na base de conhecimento (HAYES-ROTH, 1990).

Assim sendo, a arquitetura quadro-negro é de grande utilização. Ela é uma forma de estruturação robusta e versátil para agentes que necessitam sincronizar suas ações.

3.6.3. Arquitetura de subsumption

A arquitetura de subsumption, também conhecida como arquitetura de Brooks, é considerada uma das precursoras na proposta de arquiteturas de agentes, sendo fortemente utilizada para controle e tomada de decisões em robôs e pelo mapeamento direto da situação a ação (BROOKS, et al., 1986). Essa arquitetura tem como idéia principal a construção de camadas de controle que correspondem a um nível de competência. Dessa forma, quando há necessidade de uma nova competência, então é possível acrescentar mais um nível, ou seja, mais uma camada responsável por atender a nova competência (BROOKS, 1985). Esta arquitetura possibilita ainda a criação de uma estrutura com um projeto robusto sendo que alguns níveis de inteligência podem falhar. Neste caso, os níveis mais baixos podem ainda atuar por meio das ações necessárias (mais elementares). Estas últimas são as responsáveis pelas ações reativas. Deve-se notar que para cada nível acima, as reações tornam-se cada vez mais cognitivas. Assim sendo, os níveis

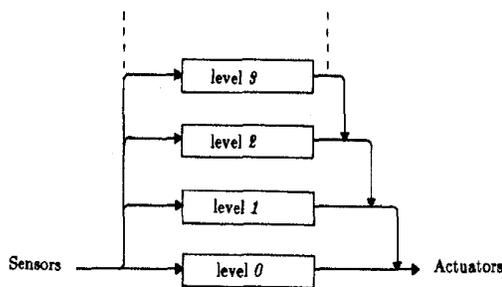


Figura 20 – Arquitetura de subsumção (BROOKS, 1985).

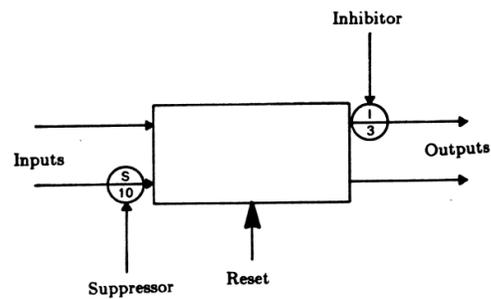


Figura 21 – Supressores e inibidores da arquitetura de subsumção (BROOKS, 1985).

mais baixos inibem os níveis mais altos, como ilustrado na Figura 20.

A arquitetura de subsumção utiliza um conjunto de comportamentos direcionados para a tomada da decisão no cumprimento de uma tarefa. Um agente que implementa tal arquitetura recebe estímulos por meio de seus sensores, mapeando esses estímulos para a realização de uma ação. Cada módulo de competência pode ser considerado uma má-

quina de estado finita, que possui um sinal de entrada e um sinal de saída. Cada máquina aceita um sinal de supressão (o resultado do módulo será suprimido pelo módulo de baixo), inibição (o resultado do módulo será inibido pelo módulo de cima) e também sinal de redefinição (o módulo pode ser redefinido para estado nulo), conforme ilustra a Figura 21. Desta forma, a saída será executada pelo módulo que provavelmente elaborou a melhor solução.

Um exemplo mais prático para uma arquitetura de subsunção seria a de um agente que pudesse acionar controles de uma locomotiva a fim de pilotar um trem de carga ou de passageiros. Dessa forma, alguns módulos de competência seriam mais influentes que outros, ou seja, o módulo em um nível mais baixo seria competente para manter a segurança, impedido eventos como ultrapassagem de velocidade máxima, verificação da distância de segurança em paradas com frenagem confortável, verificação da distância de segurança em frenagem de emergência entre outros. Um segundo módulo com um nível acima seria responsável por controlar a velocidade de cruzeiro baseada no tempo estipulado de viagem. Por fim, um último módulo capaz de verificar o ponto de aceleração necessário para chegar à velocidade desejada com um consumo mínimo de combustível.

3.6.4. Arquitetura de tarefas concorrentes

A arquitetura de tarefas concorrentes é igualmente formada de módulos verticais, porém, tenta obter uma maior flexibilidade no que diz respeito à forma de ligações entre eles. A concepção dessa arquitetura é relacionada à quebra de ligações fixas entre os módulos, permitindo uma maior flexibilidade no escalonamento das tarefas (FERBER, 1999).

Nessa arquitetura um agente é formado por um conjunto de tarefas, no qual apenas uma pode estar ativa. Portanto, essas tarefas ficam concorrendo a uma seleção por meio de um mecanismo de decisão. Para tal são levados em conta vários parâmetros como: o peso atribuído a uma tarefa em certo momento, o contexto da aplicação que está sendo executada, a informação do ambiente e outras informações que sejam relevantes a execução.

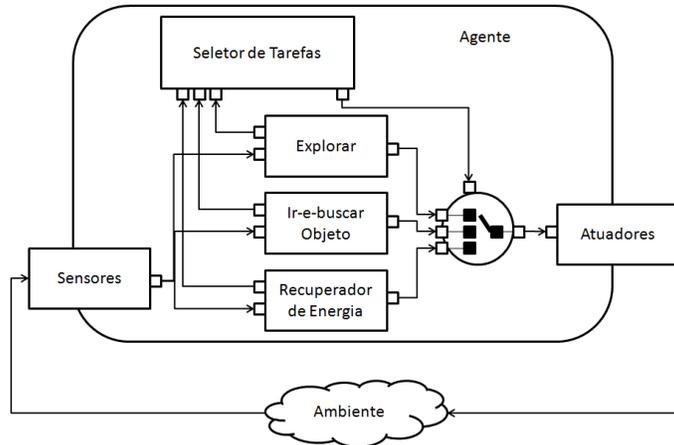


Figura 22 – Esquema de um agente baseado em uma arquitetura de tarefas concorrentes, no qual o seletor de tarefas escolhe a tarefa que apresenta o maior valor obtido por meio de uma função de avaliação. Figura adaptada de (FERBER, 1999).

A Figura 22 mostra um agente formado por essa arquitetura e o processo de seleção de uma tarefa. Nessa arquitetura, um módulo de seleção recebe parâmetros de várias tarefas e verifica qual a melhor, utilizando uma função de avaliação que decide qual módulo será executado. Após essa seleção o agente realiza uma ação com o ambiente por meio de seus atuadores.

3.6.5. Sistemas de produção

Sistemas de produção é uma arquitetura de agentes muito difundida na inteligência artificial, sendo um sistema de produção baseado em regras, com uma concepção por meio da combinação de uma base de dados, uma base de regras de produção e um interpretador (motor de inferência). Nessa arquitetura são concebidas várias formas de sintaxe, porém o padrão utilizado consiste em uma lista de condições que fica associada a uma base de dados e uma lista de ações elementares utilizada para remoção e inserção e elementos na base de dados (FERBER, 1999).

Também segundo Ferber, pode ocorrer ativação de ações de forma direta para os agentes. Uma regra pode validar cada uma das condições de sua lista com a execução de ações correspondentes. Poderá ocorrer um conflito entre as regras caso várias delas sejam selecionadas, com isso o interpretador deve selecionar ou ativar a regra de maior prioridade, Isto depende dos parâmetros internos do estado. Em caso de manutenção de

conflito, então a regra selecionada será simplesmente a que estiver em primeiro lugar na ordem de entrada. Essa arquitetura é mostrada na Figura 23.

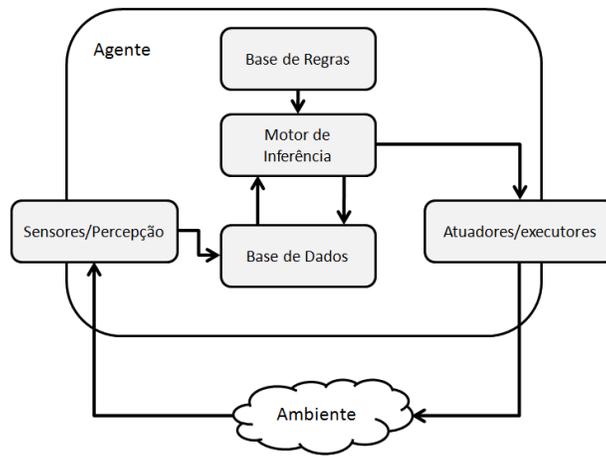


Figura 23 – Esquema de um agente baseado em sistema de produção. Figura adaptada de (FERBER, 1999).

No contexto de sistema multiagente, no qual cada agente será concebido na forma de sistemas de produção, o esquema da Figura 23 mostra apenas um agente e a forma de ação com o ambiente. Nele as funções de percepção são incumbidas de captar informações do ambiente ou comunicações percebidas na base de dados, enquanto que o interpretador (motor de inferência), por meio da base de regras analisa as informações. Feita essa análise, o interpretador reage. Tal reação pode desabilitar uma regra na base de dados e também gerar a execução da regra selecionada.

Nessa arquitetura existem dois inconvenientes, sendo o primeiro relacionado ao mecanismo de eliminação da ação na base de dados pelo interpretador, devido à natureza não monotônica dele e para lidar com esse problema as regras devem ser agrupadas em pacotes. Para tal, deve ser levado em conta o conhecimento do algoritmo do motor de inferência juntamente com a verificação das prioridades das regras e na ordem que elas são aplicadas. O outro inconveniente seria a não possibilidade de combinação das regras, onde novamente a solução seria a elaboração de um pacote de regras (conjunto de regras) com uma ligação entre elas.

3.6.6. Arquitetura reativa

Na arquitetura reativa não é encontrada nenhum modelo simbólico do mundo e não é utilizado raciocínio simbólico complexo (WOOLDRIDGE, et al., 1995). Decisões são tomadas diretamente por meio de mapeamento direto de um contexto para uma ação (WEISS, 1999). Assim, os sistemas baseados nessa arquitetura executam ações em tempos relativamente baixos, pois não necessitam ler e armazenar tais informações. Porém, esse sistema é fortemente dependente do ambiente onde estão inseridos, por serem absolutamente reflexivos. A arquitetura reativa é será de melhor utilização em sistemas de resolução de problemas em tempo real. A Figura 24 mostra uma arquitetura reativa genérica.

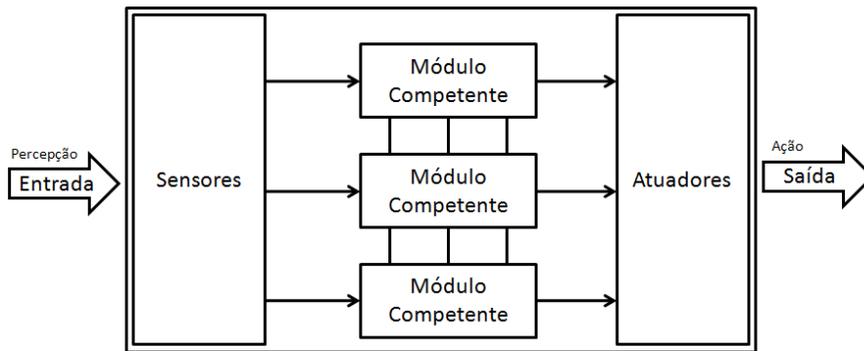


Figura 24 – Arquitetura de um agente reativo genérico. Figura baseada em (WEISS, 1999).

Essa arquitetura surgiu no final dos anos 80. Nesse período havia alguns questionamentos com relação à área da inteligência artificial lógica/simbólica. Nessa discussão questionam-se: se os recursos computacionais da época não seriam suficientes e se uma linguagem de representação lógica não seria capaz de operar em um ambiente que necessitasse de respostas em tempo real. Nesse ponto surgiram novas abordagens para tratamento de agentes que operassem em ambientes de tempo real, como os agentes da arquitetura subsumption ou de Brooks (BROOKS, et al., 1986).

3.7. Trabalhos relacionados

Existem vários sistemas envolvidos na área de transporte que utilizam a tecnologia de sistema multiagente.

Em (ABBINK, et al., 2009) é utilizada uma organização de agentes para simulação de reorganização de viagens de trens em um ambiente dinâmico. Nesse trabalho são inseridos vários agentes com capacidades diferentes, como: de condução, de despacho, de calendário, de análise, de rotas e de rede. Todos trabalhando em níveis diferentes e comunicando entre si a fim de simular um ambiente real, onde é de extrema importância chegar a possíveis reorganizações de horários, rotas e realocação de trens, visando manter trens em seus horários de chegada e saída, mesmo com eventuais perturbações no ambiente que possam acarretar atrasos.

No trabalho de (PROENÇA, 2003) é desenvolvido um sistema multiagente para o controle de tráfego ferroviário. A finalidade é utilizar um sistema multiagente completamente descentralizado preparado para tratamento autônomo de situações excepcionais e com característica de adaptabilidade ao tráfego dessa rede. Sua arquitetura é formada por agentes com competências diferentes como: agentes de trens, de estação, de supervisores e de aprendizado.

Em (TÖRNQUIST, et al., 2002) para minimizar atrasos de trens na rede ferroviária sueca, foi elaborado um sistema multiagente para calcular e recalcular de forma otimizada a hora prevista de chegada de cada trem. Nesse trabalho são feitas simulações de técnicas tradicionais de simulação de viagens e simulações feitas por um sistema multiagente tendo como base a tomada de decisão entre os agentes desse sistema. A intenção básica desse trabalho é minimizar os atrasos dos trens. O primeiro passo é trabalhar com a necessidade de calcular um tempo de previsão de chegada com alta qualidade, ou seja, pode ser necessário recálculos de um novo tempo de previsão de chegada mais preciso, quando os atrasos de calendário ocorrerem. A solução deste problema é utilizada em uma segunda etapa para a solução de um problema maior, como a avaliação de ações, que visa comparar diferentes estratégias para solucionar problemas de atrasos em tempo real, que não comprometam todo um sistema.

Em (BASRA, et al., 2005) é utilizada uma estrutura de agentes que utilizam um quadro-negro para compartilhamento de fontes de dados e conseqüentemente uma interação entre o sistema, no qual o intuito é controlar um sistema viário com uma linha férrea localizada em Londres (THE TUBE, 2010) que compreende cerca de 400 milhas

de rota e uma estimativa de 180 milhões de passageiros por ano. No trabalho em questão, os agentes fazem suas interações por meio de um quadro-negro para negociar recursos, sendo esses recursos: horários de saída, de chegada, de tempo de parada em estações, de tempo de viagem em sub-trechos, de pontos aptos de ultrapassagem, de alocação de tripulação, dentre outros.

Em (NGUYEN-DUC, et al., 2008) é descrito um sistema multiagente para controle de tráfego aéreo. Nesse trabalho foi desenvolvido uma estrutura de agentes capazes de comunicar com os controladores por meio de agentes auxiliares e agente que monitoram as ferramentas de software. A capacidade dos agentes para trocar dados entre si permite a aquisição de informações em tempo real para ser apresentada aos controladores.

Os agentes envolvidos no sistema são de tipos diferentes, tais como: agentes sentinelas de dados que observam entradas e saídas de dados do software de controle e enviam informações para outros agentes, a fim de descobrir perdas de dados; agentes sentinelas de cálculos que verificam falhas de cálculos e *timeouts* enviando essas falhas para outros agentes; e agentes auxiliares que fazem monitoramento para disponibilidade de informações e comportamentos dos controladores de modo que possa relatar possíveis falhas de conduta.

No nível individual esses agentes não necessitam de comunicação constante, de forma que agentes de vigilância simplesmente reagem a incidentes técnicos, tendo capacidades de reação autônoma. O sistema multiagente torna-se cada vez mais robusto graças ao nível/capacidade de comunicação. Tal sistema multiagente se utiliza de uma plataforma Java desenvolvida pela *Eurocontrol* que utiliza *RMI (Remote Method Invocation)* para distribuir os seus componentes em uma *LAN (Local Area Network)*, com um conjunto de elementos standard *ATC (Air Traffic Control)*, utilizando também diversos meios de informação como: "*espaço aéreo*" (uma base de dados de informações estáticas do espaço aéreo); "*vigilância aérea integrada*" (uma base de dados de faixas de vigilância por radar); "*plano de vôo inicial*" (um plano inicial que define os pontos da rota de restrição e limites de altitude); "*perceptor de trajetória*" (um algoritmo de previsão de trajetória, que utiliza aeronaves modelos cinemáticos para prever o movimento real de um avião particular); "*controlador de posição de trabalho*" (a principal interface gráfica para o sistema baseado num display com um mapa do setor de controle); e várias outras ferramentas de suporte para controladores de tráfego aéreo. Dessa forma um sis-

tema multiagente pode ser capaz de responder de forma adequada a sistemas de alta complexidade e que utilizam bases de dados persistentes ou dinâmicas.

3.8. Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentadas algumas das características de agentes e sistemas multiagentes mais utilizados e em ambientes da área de transporte, contudo esse capítulo mostrou algumas das características de agentes e sistema multiagente de forma a engrandecer a utilização dessa abordagem em ambientes da área de transportes, tanto aéreo como ferroviário, que por sua vez são dinâmicos, imprevisíveis e de alta complexidade.

No próximo capítulo será descrita uma metodologia utilizada para resolução do problema de paradas em desvios utilizando ferrovias de linha singela.

4. METODOLOGIA E RESULTADOS

4.1. Considerações iniciais

Nesse trabalho foi definido um sistema computacional baseado em uma arquitetura multiagente reativa, no qual cada agente reage a percepções provenientes do ambiente (parcialmente representado pela via férrea), bem como as mensagens recebidas de outros agentes. A atuação desse sistema visa conduzir os trens, em particular no controle e otimização do uso de desvios férreos por esses trens. O controle e a otimização prezam pela a segurança, a economia de combustível e a realização de uma viagem dentro do tempo estipulado.

4.2. Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema envolve agentes com diferentes competências e distribuídos em um ambiente parcialmente conhecido. A Figura 25 mostra a disposição dos agentes em um trecho de via férrea da seguinte forma:

- **Na parte superior**, um agente ***E*** capaz de representar parcialmente e perceber eventos da uma malha férrea;
- **Na parte intermediária**, um agente ***L*** capaz de manter e comunicar licenças. ***L*** realiza sua competência interagindo com o agente ***E***, na busca de um trecho de via férrea que ele irá controlar. Na sequência, ele interage também com os agentes de controle ***A_i***, um em cada trem, para a liberação da entrada do trecho controlado de via férrea;

- **Na parte inferior**, há vários agentes A_i , no qual cada agente é especializado em conduzir um trem e se comunicar com o agente L para obter permissão do trecho desejado.

A finalidade principal do sistema é a coordenação entre os agentes de trens A_i e o agente de licença L para que ambos os trens consigam utilizar um recurso (desvio) de forma compartilhada. Ou seja, os agentes de trens A_i realizam a condução a fim de evitar as situações onde um dos trens seja obrigado a permanecer parado por um determinado tempo.

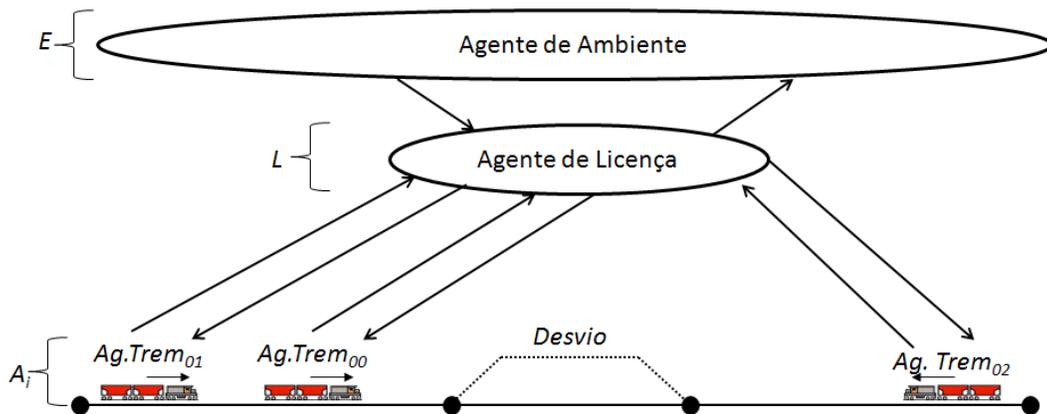


Figura 25 – Cenário de atuação dos agentes.

O agente de licença age como um mensageiro entre os agentes do tipo trem. A mensagem que chega de um agente de trem é repassada especificamente para o outro agente de trem com a maior proximidade. Ou seja, o agente de licença somente repassa as mensagens entre agentes de trem que estão em rota de colisão ou concorrendo pelo recurso (desvio). Portanto os agentes de trem que não estão em conflito pela utilização do desvio ou sem risco de colisão apenas recebem mensagens de controle que são mensagens de aviso de posicionamento.

A seguir será mostrada a forma como é realizada a condução de um trem, bem como metodologia de cálculos para esse fim.

4.3. Condução de trens

Apesar de um trem ser direcionado por meio de trilhos, a sua condução é uma técnica complexa: deve sempre obedecer a várias regras de segurança; restrições; e sinalizações da via férrea como podem ser vistas no Capítulo 2.

Todas as técnicas utilizadas para conduzir um trem são comumente chamadas de regras de condução que podem ser vistas em (BORGES, 2009), nos quais são mostrados conjuntos de regras de condução obtidos através de mineração de dados dos logs de viagens, nesse trabalho as regras estão dispostas em uma forma mais detalhada buscando os métodos como maquinistas pilotam as locomotivas.

Neste trabalho serão mostrados a condução de um trem com base na perspectiva dos cálculos envolvidos na: aceleração; desaceleração; tempos; deslocamento e consumos que serão vistos nas seções a seguir.

4.3.1. Cálculos de movimento

As locomotivas utilizadas em trens de carga no Brasil são dotadas de um sistema de motorização híbrida, ou seja, essas locomotivas são diesel-elétricas. Esse sistema utiliza um motor de combustão diesel que alimenta um gerador elétrico, que por sua vez fornece essa energia a motores elétricos localizados em cada eixo da locomotiva. Nas motorizações híbridas são evitadas as dificuldades impostas pelas limitações do motor térmico a pistão bem como o uso de um complicado sistema de transmissão da potência do motor às rodas. O motor diesel trabalha em velocidades menores e com menos variação, trabalhando em condição otimizada de funcionamento, privilegiando o consumo de combustível e sua durabilidade.

Uma locomotiva para iniciar o movimento de um trem deve, a princípio, ser capaz de exercer uma força suficiente para vencer a força exercida pelo seu próprio peso mais a soma de todos os pesos dos vagões engatados a ela. A equação utilizada para calcular a potência capaz de deslocar um trem é usualmente chamada de equação de força tratora efetiva, como mostra a Equação 2, que retorna um valor em *Kgf*.

$$F_{TE} = \frac{273.24 \times 0.82 \times HP}{V} \quad (2)$$

onde:

- *HP* é a potência de uma locomotiva (em *Horse Power*);
- *V* é a velocidade final (em *Km/h*);
- 0.82 constante relacionada à perda de eficiência entre o motor diesel e o motor elétrico e;
- 273.24 constante calculada empiricamente.

Cada valor de *HP* de uma locomotiva é relacionado a um ponto de aceleração que é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Potência e Consumo de uma Locomotiva Modelo C30.

Ponto de Aceleração	Potência (HP)	Consumo (l/min)
Dinâmico	0	0,3168
Neutro	0	0,3168
1	100	0,5670
2	275	1,0668
3	575	1,9500
4	960	3,0330
5	1440	4,5330
6	1930	6,1830
7	2500	7,6998
8	2940	9,4002

Na Tabela 1 são ilustrados um ponto dinâmico, um ponto neutro e pontos de 1 a 8, referentes a um modelo de locomotiva denominada C30. Existem outros modelos de locomotivas, porém, para esse trabalho a locomotiva utilizada foi a de modelo C30.

Os pontos de aceleração são semelhantes as marchas de um automóvel, porém não existe acelerador, cada ponto tem a numeração como se fosse uma marcha, mas ao ser selecionado cada ponto oferece uma potência que será transformada em movimento como indica a Equação 2.

Os pontos de aceleração devem ser utilizados por um maquinista de forma que não gere potência excessiva, para não ocasionar o deslizamento das rodas contra os tri-

lhos (patinagem). Para verificar se ocorre essa patinagem uma equação chamada de força tratora aderente é utilizada, como mostra a Equação 3, que retorna um valor em *Kgf*.

$$F_{TA} = \frac{P \times f}{1 + (0.01 \times Vm)} \quad (3)$$

onde:

- *P* é o valor do peso da locomotiva (em toneladas);
- *f* é o coeficiente de aderência e;
- *Vm* é a velocidade média (em Km/h).

A patinagem de uma locomotiva acontece quando o valor da Equação 2 supera o valor da Equação 3. Porém, para um trem entrar em movimento a força tratora efetiva deve ser inferior a força tratora aderente e superior a duas resistências a seguir:

- **Acidentais:** resistências de rampas (aclive e declive) e de curvas;
- **Normal:** resistência relacionada a atritos de eixos, mancais, ar e peso.

Essas resistências são calculadas pelas equações de Davis, publicadas em 1926, para realização de cálculos de lotação. Esses cálculos são utilizados para montar um trem de forma que ele tenha potência suficiente para ultrapassar o trecho mais crítico, que seria o ponto de maior resistência de todo o trajeto realizado em uma viagem.

A Equação 4 define o cálculo total dessas resistências, retornando um valor de resistência em *Kgf*.

$$R_{Total} = n_l \times (R_{nl} + R_{cl} + R_{il}) \times P_l + n_v \times (R_{nv} + R_{cv} + R_{iv}) \times P_v \quad (4)$$

onde:

- *n_l* é o número de locomotivas do trem;
- *R_{nl}* é a resistência normal de uma locomotiva (em *Kgf*);
- *R_{cl}* é a resistência de curva de uma locomotiva (em *Kgf*);
- *R_{il}* é a resistência de rampa de uma locomotiva (em *Kgf*);
- *P_l* é o peso da locomotiva (em toneladas);
- *n_v* é o numero de vagões do trem;

- R_{nv} é a resistência normal de um vagão (em Kgf);
- R_{cv} é a resistência de curva de um vagão (em Kgf);
- R_{iv} é a resistência de rampa de um vagão (em Kgf) e;
- P_v é o peso da vagão (em *toneladas*).

A resistência de rampa é calculada pela Equação 5, que retorna um valor em Kgf para cada vagão ou locomotiva.

$$R_i = 10 * i \quad (5)$$

onde:

- i corresponde à porcentagem de inclinação de uma rampa, valor positivo para um aclave e valor negativo para um declive.

A resistência da curva é calculada pelas Equações 6 para locomotivas e Equação 7 para vagões, que retornam valores finais em Kgf .

$$R_{cl} = 0.2 + \frac{100}{R} \times (p + b + 3.8) \quad (6)$$

$$R_{cv} = \frac{500 \times b}{R} \quad (7)$$

onde:

- R é o raio da curva (em *metros*);
- p é a base rígida (distância entre os eixos da locomotiva) (em *metros*) e;
- b é a bitola da linha férrea (em *metros*).

As resistências normais são calculadas pelas Equações 8 para locomotivas e 9 para vagões, que retornam valores finais em Kgf .

$$R_{nl} = 1.3 + \frac{29}{w} + 0.03 \times V + \frac{0.0024 \times A \times V^2}{w \times n} \quad (8)$$

$$R_{nv} = 1.3 + \frac{29}{w} + 0.045 \times V + \frac{0.0005 \times A \times V^2}{w \times n} \quad (9)$$

onde:

- w é o valor de peso por eixo (em toneladas);
- V é a velocidade (em milhas por hora *Mph*);
- A é a área frontal (em polegadas quadradas) e;
- n é o número de eixos.

As equações das resistências normais podem ser substituídas por uma equação chamada de equação de Davis modificada, tal equação representa o cálculo tanto para locomotivas quanto para vagões. A Equação 10 define o valor dessa resistência em *Kgf*.

$$R_n = 0.6 + \frac{20}{w} + 0.01 \times V + \frac{0.07 \times V^2}{w \times n} \quad (10)$$

Após os cálculos das resistências e forças, a movimentação de um trem pode ser definida por uma equação que resulta na força aceleradora necessária para o movimento. A Equação 11 define essa força aceleradora resultante para a movimentação, que retorna um valor em *Kgf*.

$$F_{AC} = F_{TE} - R_{total} \quad (11)$$

Na Equação 11, se F_{AC} for positiva, o trem tem força suficiente para iniciar um movimento positivo. Entretanto, se a resultante de F_{AC} for negativa o trem iniciará uma perda de velocidade ou até mesmo ter uma movimentação negativa, se ele estiver com seu movimento inicial nulo.

Com o resultado da Equação 11 é possível obter a quantidade de movimentação de um trem utilizando para isso a Equação 12, que define o deslocamento (D) ocorrido em metros.

$$D = \frac{4 \times P \times (Vf^2 - Vi^2)}{F_{AC}} \quad (12)$$

onde:

- V_f é a velocidade final (em m/s);
- V_i é a velocidade inicial (em m/s) e;
- P o peso do trem (em *toneladas*).

Após o resultado do cálculo de deslocamento pela Equação 12 é possível obter o valor do tempo (T) com base no deslocamento (D) já calculado, utilizando para isso a Equação 13 que retorna um valor em segundos.

$$T = \frac{7.2 \times D}{V_f + V_i} \quad (13)$$

Utilizando as equações na sequência de 2 a 13 é possível obter todos os resultados relacionados a movimentação de um trem. Um estudo aprofundado dessas equações pode ser verificado em (BRINA, 1982).

4.3.2. Cálculos de consumo

As informações mais importantes, do ponto de vista econômico, para as empresas do setor ferroviário, são os valores referentes ao consumo de um trem. A Equação 14 define o cálculo do consumo (C_T) de um trem com relação ao tempo do seu deslocamento. A Equação 14 retorna um valor de consumo em litros por minuto.

$$C_T = \frac{C_{PA}}{60} \times T \quad (14)$$

onde:

- C_{PA} é o consumo do ponto de aceleração da locomotiva, com base na Tabela 1, para locomotivas do modelo C30.

Com base na Equação 14 é possível obter o valor de consumo acumulado de uma viagem utilizando o cálculo de LTKB⁵ definido pela Equação 15.

⁵ A sigla LTKB significa litros por tonelada bruta transportada, esse valor define o consumo total efetuado por um trem em uma viagem completa.

$$LTKB = \frac{CA}{P \times \left(\frac{DA}{1000}\right)} \times 1000 \quad (15)$$

onde:

- CA é o valor acumulado (em litros) dos consumos gerados pela Equação (14);
- P é o peso do trem (em toneladas) e;
- DA é a distância acumulada da viagem (em metros).

Portanto, as Equações 14 e 15 são responsáveis pelos cálculos dos consumos relacionados à movimentação de um trem.

4.3.3. Cálculos de frenagem

Realizar a frenagem de um trem é uma operação igual ou maior que apenas movimentá-lo, pois a frenagem envolve uma série de percepções de um condutor, onde em certos trechos em declive forte, como em serras, os freios tendem a serem muito utilizados. Um trem possui três tipos de freios:

- **Freio automático:** é um freio pneumático formado por um compressor de ar em cada locomotiva que fornece ar para um encanamento. Esse sistema de freio começa no compressor de ar de uma locomotiva sai por um encanamento que passa por todos os vagões. Ele fornece ainda pressão para cilindros de freio que conseqüentemente exercem força de pressão entre uma sapata de freio e a roda do vagão. Esse freio atua apenas nas rodas dos vagões. Ou seja, é um freio com propagação da frente do trem para trás e depende de um tempo de atuação relacionado ao comprimento do trem e da pressão máxima dos compressores que vão de 70 a 110 PSI^6 ;
- **Freio dinâmico:** é um freio a motor utilizado por meio da inversão dos pontos de aceleração. Nesse freio geralmente a mesma manopla dos pontos de aceleração é utilizada. O maquinista tem um ponto máximo e mínimo de utilização desse freio dependendo da sua necessidade. A curva de ação no ponto máximo é ilustrada pela Figura 26;

⁶ Libra força por polegada quadrada é a unidade de pressão.

- **Freio independente:** é um freio mais utilizado para manobras em pátios ou em baixas velocidades.

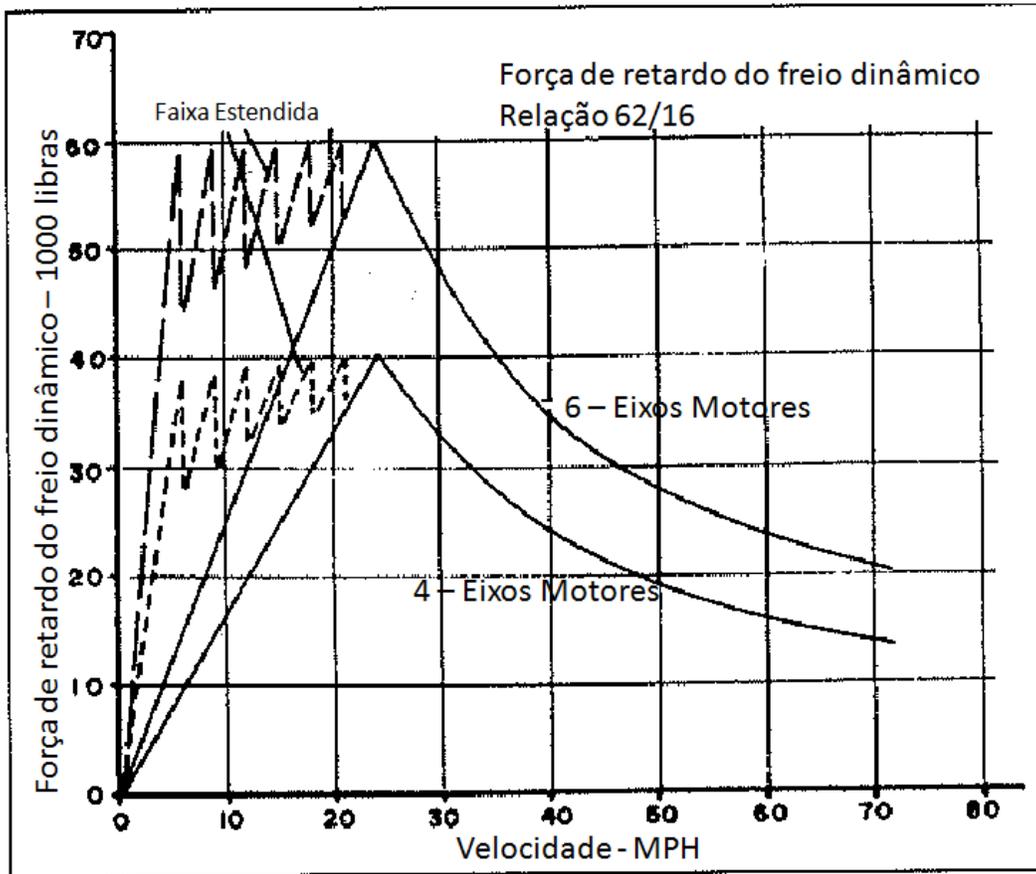


Figura 26 – Gráfico da força de um freio dinâmico (LOUMIET, et al., 2005).

A Figura 26 mostra o gráfico de forças utilizadas por locomotivas contendo 4 e 6 eixos. O freio dinâmico de uma locomotiva tem seu melhor desempenho quando o trem possui uma velocidade entre 17 e 25 *mph* ou aproximadamente entre 27 e 40 *km/h* (LOUMIET, et al., 2005).

Neste trabalho o freio automático foi o mais utilizado, sendo esse o freio de maior importância de um trem devido a sua elevada força de retardo. Ele é responsável pelas frenagens de controle de velocidade e também de emergência. Os outros dois freios são mais utilizados em conjunto com o freio automático. A Figura 27 ilustra o esquema de um freio automático de um trem.

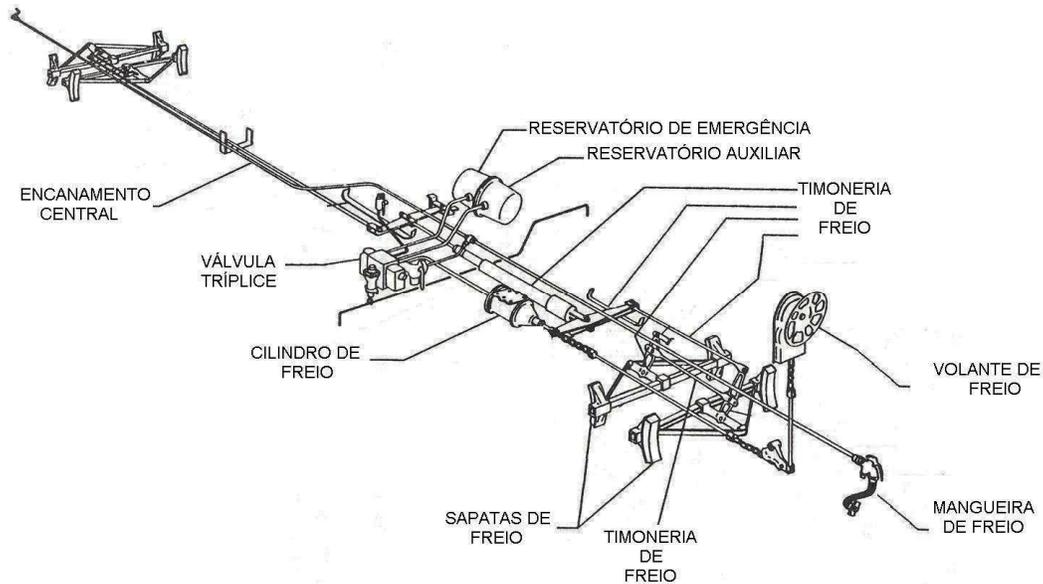


Figura 27 – Esquema do sistema de freio automático.

A frenagem automática, segundo (MARTINS, 1999) é definida pelo cálculo da força retardadora do veículo na Equação 16.

$$F_{RV} = ar \times P_{cl} \times ra \times ef \times ca \times 10 \quad (16)$$

onde:

- F_{RV} é a Força retardadora do veículo (em *Newtons*);
- ar é a área do êmbolo do cilindro de freio (em m^2);
- P_{cl} é a pressão no cilindro de freio (em kPa);
- ra é a relação da alavanca e a timoneira de freio;
- ef é a eficiência da timoneira de freio (em %); e
- ca é o coeficiente de atrito entre a sapata de freio e a roda.

O cálculo para a frenagem realizado pela Equação 16 é definido para um vagão individual, tendo que ser multiplicado à resultante pela quantidade de vagões. A utilização da Equação 16 neste trabalho teve algumas modificações no sistema de conversão de alguns valores, pois a unidade de medida de pressão comumente utilizada é o *PSI* ao

contrário da Equação 16 que utiliza o kPa^7 . O valor da frenagem obtida deve corresponder em 6.5% para um vagão vazio e 10% para um vagão carregado.

Outro cálculo importante para um trem é a sua distância de parada. Segundo (LANDEX, 2008) o cálculo da distância de parada para um trem de carga é definido pela Equação 17 que retorna um valor percorrido até a parada em metros.

$$D = \frac{V^2}{2 \times r_b} \quad (17)$$

onde:

- V é a velocidade (em m/s);
- r_b é uma força retardadora de 0.225 m/s^2 para uma parada suave de um trem de carga ou 0.3 m/s^2 para uma parada forte de um trem de carga.

Uma visão mais aprofundada dos cálculos de parada envolvendo a Equação 17 pode ser obtida em (LANDEX, 2010).

Em (BENTLEY, et al., 2007) também é detalhado um método de cálculo de parada. Porém, esse método define cálculos para se obter uma parada de emergência, sendo eles executados para a obtenção do menor tempo e distância de parada possível.

A Equação 18 define o valor de eficiência do equipamento de frenagem.

$$R_{eff} = \frac{\left(\frac{\left(\frac{C_T - \sum C_l}{U} \right) - 50}{4} \right) + 80}{100} \quad (18)$$

onde:

- R_{eff} é a eficiência dos equipamentos de frenagem;
- C_T é o comprimento do trem (em pés);
- C_l é o comprimento de cada locomotiva (em pés); e
- U é a quantidade de locomotivas e vagões do trem.

⁷ Kilo Pascal unidade de pressão. 1 kPa = 0,14504 PSI

Na sequência a próxima equação retorna o valor da eficiência da frenagem, onde a Equação 19 define esse valor.

$$B_{eff} = (BR) \times \left(\frac{W_e}{W_g} \right) \quad (19)$$

onde:

- B_{eff} é o valor da eficiência da frenagem;
- BR é a proporção da frenagem com um valor empírico de 1.1;
- W_e é o peso por eixo do vagão descarregado (em toneladas); e
- W_g é o peso por eixo do vagão carregado (em toneladas).

Na sequência a Equação 20 define o cálculo do valor de máximo de desaceleração para a frenagem de emergência.

$$-a_{max} = ((f_{ws} \times gr \times f_r)) \times B_{eff} \times R_{eff} \times g \quad (20)$$

onde:

- $-a_{max}$ é a desaceleração (em $pés/s^2$);
- f_{ws} é aderência da sapada com a roda;
- gr é o grau da rampa (aative ou declive, em %);
- f_r é a resistência dos rolamentos dos eixos (valor fixado empiricamente 0.0015); e
- g é aceleração da gravidade (em $pés/s^2$).

A partir dessas equações foi possível obter um tempo de parada de 22 segundos com uma distância de 140 metros e com uma velocidade de 53 km/h. Para isso, foi utilizado, um trem composto por uma locomotiva e quatorze vagões, totalizando um tamanho de 300 metros e um peso total de aproximadamente 1.290 toneladas. Os cálculos detalhados desse resultado foram obtidos por meio da adaptação dos cálculos realizados em (BENTLEY, et al., 2007). Esse cálculo foi realizado com base nos trens utilizados nas simulações deste trabalho, garantindo que a parada pode ser realizada com uma distância segura.

4.3.4. Cálculos auxiliares de coordenação

Os cálculos auxiliares de coordenação são efetuados pelos agentes de trem para obterem tempos e velocidades adequadas para as chegadas, entradas, permanências, saídas e afastamentos de uma área de conflito. Esses cálculos são feitos por meio de equações da física de movimento retilíneo uniforme. A Equação 21 é utilizada para esse fim.

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (21)$$

onde:

- V é a velocidade (em *m/s*);
- ΔS é a variação do deslocamento (em *metros*); e
- Δt é a variação do tempo (em *segundos*).

A Equação 21 é utilizada de várias formas pelo agente de trem, com uma simples inversão dessa equação e utilizando o deslocamento como incógnita é possível obter a distância a ser percorrida com base em uma velocidade atual.

Similarmente, se o agente de trem utilizar o tempo como incógnita e tendo o deslocamento a realizar e a velocidade média utilizada, é possível obter o tempo para percorrer uma parte ou totalidade do trecho.

As equações apresentadas com exceção da Equação 1, são todas utilizadas pelo módulo de cálculo do agente de trem, sendo esse agente o mais relevante nesse trabalho.

4.4. Definição dos agentes

Os agentes propostos neste trabalho são de natureza reativa, formando um sistema multiagente reativo. Nesse sistema os agentes possuem uma organização hierárquica, no qual um tipo de agente possui maior influência sobre outros.

4.4.1. Modelagem da arquitetura do sistema

O sistema multiagente está distribuindo na seguinte forma:

- **Agente de Ambiente:** agente que tem a capacidade de percepção de uma malha férrea, ou seja, ele possui uma representação completa dos trechos de uma malha que pode se estender em algumas regiões geográficas como municípios, regiões metropolitanas, estados e países. Ele é capaz de comunicar e repassar informações dos trechos da malha férrea aos agentes de licença;
- **Agente de Licença:** agente capaz de interagir com o Agente Ambiente na busca de um trecho que contenha uma área de conflito. Tal trecho possui alguns quilômetros de extensão e um ponto de conflito. Cada ponto de conflito poderá ser um desvio, cruzamento ou pátio de manobras. Ele também exerce a tarefa de repassador de mensagens entre os agentes de trens, arbitrando as entradas desses agentes no trecho sobre o qual ele tem a percepção. Agentes de licença são responsáveis por verificar a capacidade do trecho que está sob seu domínio;
- **Agente de Trem:** agente capaz de encontrar um agente de licença para conseguir autorização para trafegar no trecho controlado por esse agente. A partir de uma autorização, o agente de trem recebe ou não uma autorização para continuar a trafegar e inicia a percepção (obtenção de informações) do trecho negociado. Os agentes de trens conseguem perceber outros agentes de trens interagindo com o agente de licença. Agentes de trem também são especializados na condução de um trem. Para tal eles utilizam máquinas de estados em sua arquitetura.

Na Figura 28 é detalhada a organização dos agentes do sistema implementado neste trabalho.

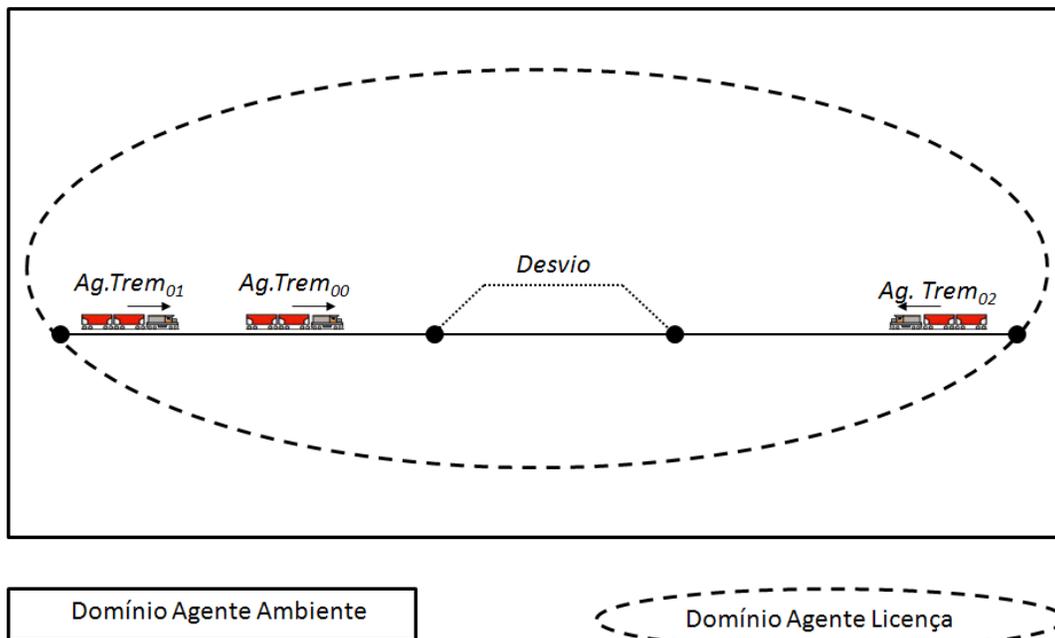


Figura 28 – Área de atuação e domínio dos agentes do sistema.

A Figura 28 mostra, de forma simplificada, a forma de atuação dos agentes, nos quais os agentes de trens encontram-se em uma hierarquia mais baixa, em seguida, em uma hierarquia intermediária, o agente de licença. A elipse tracejada indica o campo de cobertura do agente de licença. Este espaço inclui um trecho de via férrea contendo um desvio (área de conflito). A área retangular determina as delimitações do ambiente do sistema multiagente. Este ambiente é definido como um agente reativo que tem a percepção total em particular uma malha ferroviária onde o trecho em questão está contido.

4.4.2. Organização dos agentes

A organização dos agentes é determinada de forma que o agente de ambiente seja capaz de perceber todo o ambiente, ou seja, uma malha férrea na íntegra. Isto permite que o ambiente tenha condições de fornecer os recursos necessários para um ou mais agente de licença. O agente de licença tem a capacidade de perceber agentes de trens que entram em seu domínio, sendo o termo domínio a área de atuação do agente. O agente de licença, assim como os demais agentes do sistema é dotado de um protocolo que permite interagir com o agente ambiente e assumir a responsabilidade de gerenciar um trecho da via férrea. O trecho em questão é uma pequena parte da malha com um

comprimento de *19 km* e um desvio de *1 km* utilizado para as simulações deste trabalho. Porém, o sistema poderá ser utilizado em outros trechos de maior extensão.

4.4.3. Competências dos agentes

Cada agente do sistema possuem competências e um conjunto de regras que o permite coexistirem de forma a não permitir a ocorrência, principalmente, de acidentes entre os trens; tal premissa encontra-se em primeira instância. O objetivo secundário é a coordenação proativa entre dois ou mais agentes de trem para que se permita utilizar o desvio sem que nenhum dos trens seja obrigado a parar; como foi visto no Capítulo 2, uma parada além de comprometer o tempo de uma viagem ocasiona um consumo adicional importante de combustível.

A competência do agente de ambiente é gerir uma base de dados referente a um conjunto de recursos/objetos, como por exemplo, a malha férrea que compreende uma determinada região (e.g., o estado do Paraná). Em termos práticos, tal agente de ambiente limita-se a fornecer uma descrição detalhada dos recursos de um dado trecho de via férrea contendo em particular um desvio.

A competência do agente de licença consiste em atribuir-se um trecho de via férrea, gerir um conjunto de licenças e assegurar a comunicação das mesmas aos agentes de trem que adentram o espaço subordinado a tais licenças. O escopo destas últimas foi aqui limitado propositalmente ao uso compartilhado de um desvio. Cada trecho licenciado inclui os seguintes dados: quilômetro inicial e final do trecho; pontos de medida que determinam o início e fim, ou entrada e saída de tal desvio; e os limites de velocidade de tal trecho.

Em poder dessas informações, o agente de licença pode realizar o processamento de limites de capacidade do trecho, ou seja, ele deve permitir apenas a quantidade exata de trens que podem utilizar o recurso de forma otimizada. Citando dois casos em que o agente de licença executaria suas regras para impedir acidentes seriam: a proibição de entrada de um trem no trecho para evitar que ocorra mais de um trem em lados opostos do desvio; e se o somatório de cada conjunto de trem mais uma distância de segurança superarem o tamanho do desvio.

No caso de haver mais de dois trens em ambos os lados do desvio, o agente de licença emite um alerta de risco de colisão. Com esse alerta, todos os trens nesse trecho param imediatamente para que possam ser tomadas ações de desbloqueio do trecho,

lembrando que essa ocorrência deve propagar o alerta em cascata para vários outros trechos posteriores e anteriores ao trecho em questão; tal propagação não foi tratada neste trabalho devido a um maior nível de complexidade.

No outro caso, onde não ocorre mais de dois trens em cada lado do desvio, mas ocorre à incapacidade do desvio suportar o tamanho dos trens, o agente de licença é também o responsável por emitir um alerta de colisão.

Outra competência do agente de licença é arbitrar a comunicação no seu trecho de domínio. As mensagens enviadas pelos agentes de trens são repassadas por ele de forma que os remetentes e destinatários das mensagens sejam os agentes de trens que estão mais próximos da utilização do desvio e/ou mais próximos uns dos outros no mesmo sentido. O detalhamento das mensagens será mostrado posteriormente.

O agente de trem possui a competência de condução, assim como o agente de licença ele necessita obter informações da via sobre a qual ele se encontra. Então, quando estes agentes estão próximos de entrar em um trecho de domínio de um agente de licença, um pedido de permissão é emitido para o agente de licença, o agente emissor aguarda uma resposta de permissão positiva (licença concedida para entrar no trecho) ou negativa (licença negada para entrar no trecho).

Um agente de trem recebe uma permissão positiva acrescida de informações da via férrea gerida pelo agente de licença. Por meio dessa confirmação, o agente de trem inicia a percepção da via férrea e atuação. Com tal percepção, o agente de trem inicia os cálculos iniciais na busca do melhor desempenho de condução para o trecho. Ele realiza tal tarefa fazendo uso de um módulo de cálculo especializado e de um conjunto de regras contidas na sua base local de conhecimentos.

Neste trabalho, a arquitetura mais importante se refere ao agente de trem seguida do agente de licença. Essas duas arquiteturas serão detalhadas na próxima seção.

4.5.Arquitetura do agente

Como já dito, a arquitetura dos agentes é basicamente reativa.

A Figura 29 mostra a arquitetura do agente de licença. Ela inclui um módulo calculador que é responsável por realizar os cálculos necessários para: a seleção de remetentes e destinatários de mensagens; a seleção da quantidade máxima de entrada de agentes de trem no trecho; e assim por diante.

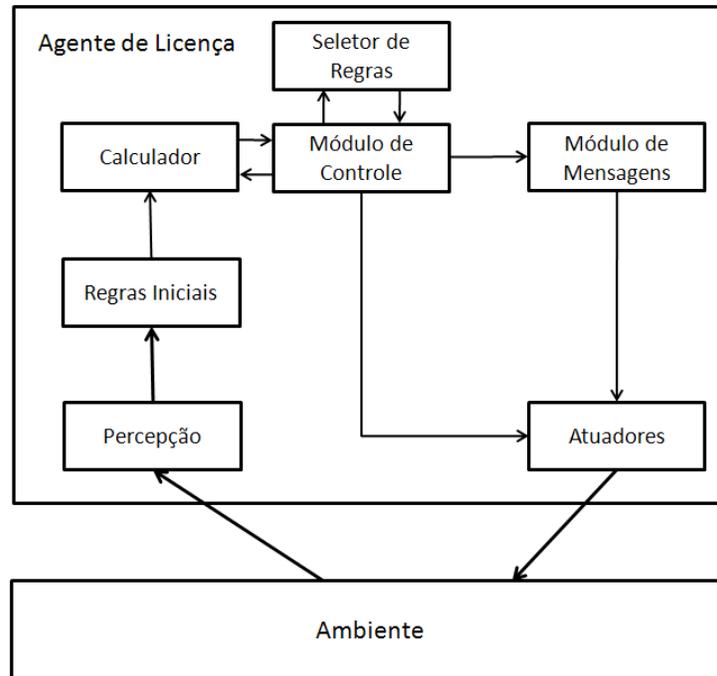


Figura 29 – Arquitetura de um agente de licença reativo.

Na Figura 30 é mostrada a definição da arquitetura do agente de trem. Esse agente possui um módulo calculador que é responsável por realiza os cálculos necessários para: a condução do trem; a verificação de consumo; os controles dos tempos e velocidades de coordenação.

Os tempos e as velocidades utilizadas na tarefa de coordenação são calculados com a seguinte sequência: aproximação; entrada; permanência; saída; e distanciação do desvio. Esses cálculos são realizados com base no tempo e velocidade do trem com a verificação e comparação do tempo, e velocidade do trem que estará concorrendo pelo desvio.

O módulo de condução utiliza recursos do módulo calculador para verificar qual o melhor ponto de aceleração para conduzir o trem. Este último sempre utilizará a força tratora necessária para se obter a velocidade ideal desejada.

Em auxílio ao módulo condutor, encontra-se o módulo seletor de regras que verifica a partir das percepções qual regra será aplicada na condução do trem. Para tal o módulo seletor de regras utiliza os recursos de várias máquinas de estados responsáveis pela seleção da melhor regra.

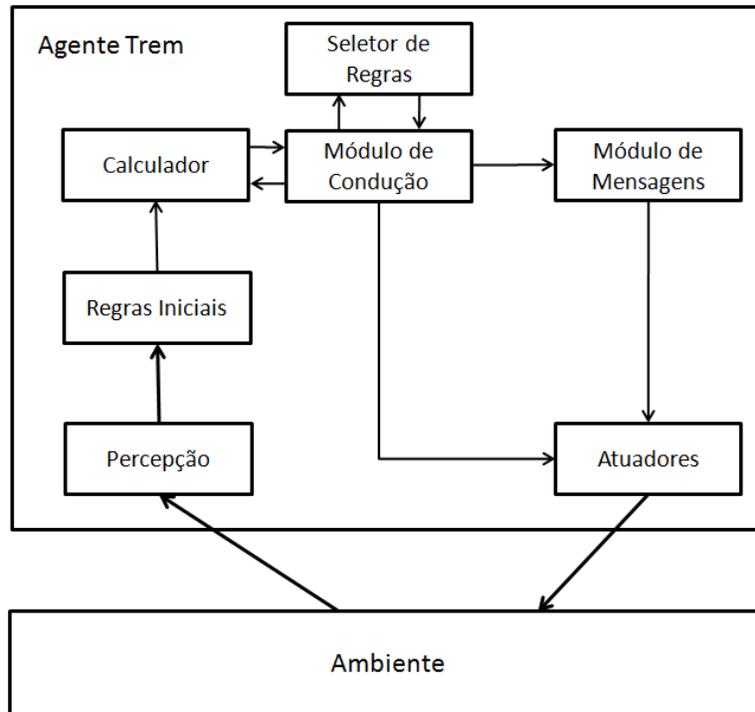


Figura 30 – Arquitetura de um agente de trem reativo.

As máquinas de estado localizadas no módulo seletor de regras funcionam em uma hierarquia de níveis, pois as regras mais importantes são aquelas que visam preferencialmente alcançar uma viagem segura e econômica.

O módulo de mensagens após, cada movimento realizado, faz a captura das informações dos resultados obtidos em cada movimentação de *20 metros* e registram em um único arquivo as mensagens; estas últimas contêm vários dados que serão mostrados posteriormente na seção 4.6.2.

4.6. Entrada de dados

As entradas de dados do sistema são feitas de três formas: a primeira pelo arquivo de via, sendo este em primeira mão interpretado pelo agente de ambiente e depois repassado de forma controlada aos outros agentes do sistema; a segunda, o agente de trem obtém informações sobre o trem que ele deve conduzir por meio da leitura de um arquivo de configuração de locomotivas e vagões; a terceira entrada de dados é feita de forma a simular as informações de uma central de controle operacional, onde são especificados os parâmetros necessários para os cálculos dos itinerários da viagem.

4.6.1. Origem e formato dos dados

O arquivo de via é originado em formato *csv*. Esse arquivo possui informações relevantes sobre a via, com os seguintes valores:

- Ponto de medida, valor mapeado da via férrea referente a cada *20 metros*;
- Quilômetro atual, valor do quilômetro onde se encontra a locomotiva líder do trem (*km*);
- Raio da curva (*metros*);
- Rampa, valor da porcentagem de um aclive ou declive ($\pm\%$);
- Velocidade máxima, valor da velocidade limite do ponto de medida (*km/h*);
- Raio auxiliar *n*, valor do raio para um desvio (*metros*);
- Indicador de desvio *n* (*valor lógico*);
- Raio auxiliar *n+1*, valor do raio para outro desvio paralelo (*metros*);
- Indicador de desvio *n+1* (*valor lógico*).

Com tais informações, os agentes de trem montam uma representação local do perfil da via férrea. Assim, o agente possui dados suficientes para realizar os cálculos necessários para conduzir o trem. O agente de trem ainda pode prever restrições devido a sua base de conhecimento da via, lhe permitindo uma visão de vários pontos de medida a sua frente, e dessa forma é possível obter uma perspectiva antecipada das características da via como a percepção de uma restrição de velocidade (e.g., segurança).

A Tabela 2 ilustra o formato do arquivo de via.

Tabela 2 – Arquivo de descrição de via férrea.

Ponto de Medida	km	Raio da Curva	Inclinação da Rampa	Velocidade Máxima	Desvio (n)	Raio da Curva (n)	Desvio (n+1)	Raio da Curva (n+1)
1	252,00	0,00	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
2	252,00	0,00	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
3	252,00	0,00	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
4	252,00	0,00	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
5	252,00	382,12	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
6	252,00	382,12	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
7	252,00	382,12	-0,67	30,00	0	0,00	0	0,00
8	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
9	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
10	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
11	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
12	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
13	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
14	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
15	252,00	382,12	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
16	252,00	0,00	0,00	30,00	0	0,00	0	0,00
17	252,00	0,00	0,00	45,00	0	0,00	0	0,00
18	252,00	0,00	0,00	45,00	1	805,45	0	0,00
19	252,00	0,02	0,00	45,00	1	908,76	1	967,89
20	252,00	0,02	0,00	45,00	1	0,00	1	1.087,07
21	252,00	0,02	0,00	45,00	1	0,00	1	0,00
...

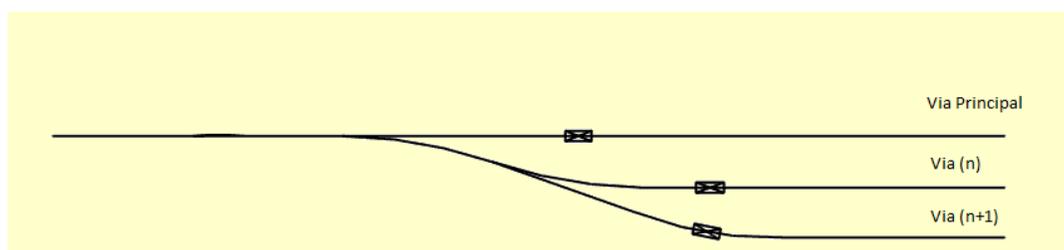


Figura 31 – Representação gráfica de um desvio descrito na Tabela 2.

Na Tabela 2, os pontos de medida vão do ponto 1 ao ponto 21 e o valor do raio da curva se inicia com a indicação de uma reta com o valor 0,00 e no ponto de medida 5 é dado início a uma curva de 382,12 metros. A inclinação da rampa começa com um declive de -0,67% e no ponto de medida 8 a via fica em nível e posteriormente no ponto de medida 19 é iniciado um aclive com inclinação de 0,02%.

O valor da velocidade máxima é iniciado com o valor máximo de 30 km/h e no ponto de medida 17 a velocidade máxima é elevada para 45 km/h. O valor desvio (n) quando for 1 (um) indica a existência de um desvio e o valor 0 (zero) indica a inexistên-

cia, sendo o raio da curva (n) o valor do raio de entrada do desvio (n), e da mesma forma, o valor do desvio ($n+1$) juntamente com o raio da curva ($n+1$) indica os valores de outro ramo do desvio que estão em formação paralela com o primeiro, conforme mostra a Figura 31.

O valor da rampa não é replicado para os valores dos outros desvios, pois se estabelece que o perfil da via férrea nesse quesito seja sempre o mesmo para todos os desvios paralelos. Dessa forma é possível a representação de vários desvios e até mesmo um pátio de manobra. Porém, neste trabalho foi utilizado um desvio simples.

Outros arquivos de configuração utilizados no sistema são ilustrados na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Arquivo de configuração de uma locomotiva C30.

Número de eixos	peso	Área Frontal	Tamanho	Base Rígida
6	167,70	120	20	2,4
Pontos de Aceleração				
Ponto	Potência	Consumo		
-8	-1,00	1,77		
-7	-1,00	1,77		
-6	-1,00	1,77		
-5	-1,00	1,77		
-4	-1,00	1,77		
-3	-1,00	1,77		
-2	-1,00	1,77		
-1	-1,00	1,77		
0	0,00	0,32		
1	100,0	0,57		
2	275,00	1,07		
3	575,00	1,95		
4	960,00	3,03		
5	1.440,00	4,53		
6	1.930,00	6,18		
7	2.500,00	7,70		
8	2.940,00	9,40		

Na Tabela 3 é ilustrada a configuração de uma locomotiva modelo *C30*, que tem as seguintes configurações: quantidade de eixos (*6 eixos*); peso total (*167,7 toneladas*); área frontal (*120 polegadas²*); tamanho ou comprimento (*20 metros*); base rígida (*2,4 metros*).

Na Tabela 3 estão as configurações dos pontos de aceleração que também são compatíveis com a Tabela 1.

Tabela 4 – Arquivo de configuração referente a 14 vagões de carga idênticos.

Id do vagão	Número de eixos	Peso tara	Área frontal	tamanho	Peso da carga
1	4,00	20,00	120,00	20,00	60,00
2	4,00	20,00	120,00	20,00	60,00
...
14	4,00	20,00	120,00	20,00	60,00

A Tabela 4 mostra a configuração de 14 vagões de carga idênticos com as seguintes configurações: id do vagão, valor referente ao posicionamento desse vagão na formação do trem; número de eixos, quantidade de eixos do vagão; peso tara, valor em toneladas do peso da estrutura do vagão (*tara*); área frontal em polegadas²; tamanho em metros; e peso da carga em toneladas (peso apenas da carga do vagão que somado ao peso da tara equivale ao peso total do vagão).

Com os dados da Tabela 3 e da Tabela 4 é possível montar um trem com uma locomotiva e quatorze vagões. Essa formação de trem foi utilizada pelo sistema nas simulações e resultados desse trabalho que são formações próximas as utilizadas para a descida na serra que vão de Curitiba – PR a Paranaguá - PR.

4.6.2. Mensagens

As mensagens trocadas pelos agentes são iniciadas com a troca de mensagens e verificações de um trecho de via férrea entre os agentes de ambiente, de licença e posteriormente pelos agentes de trem como mostra a Figura 32.

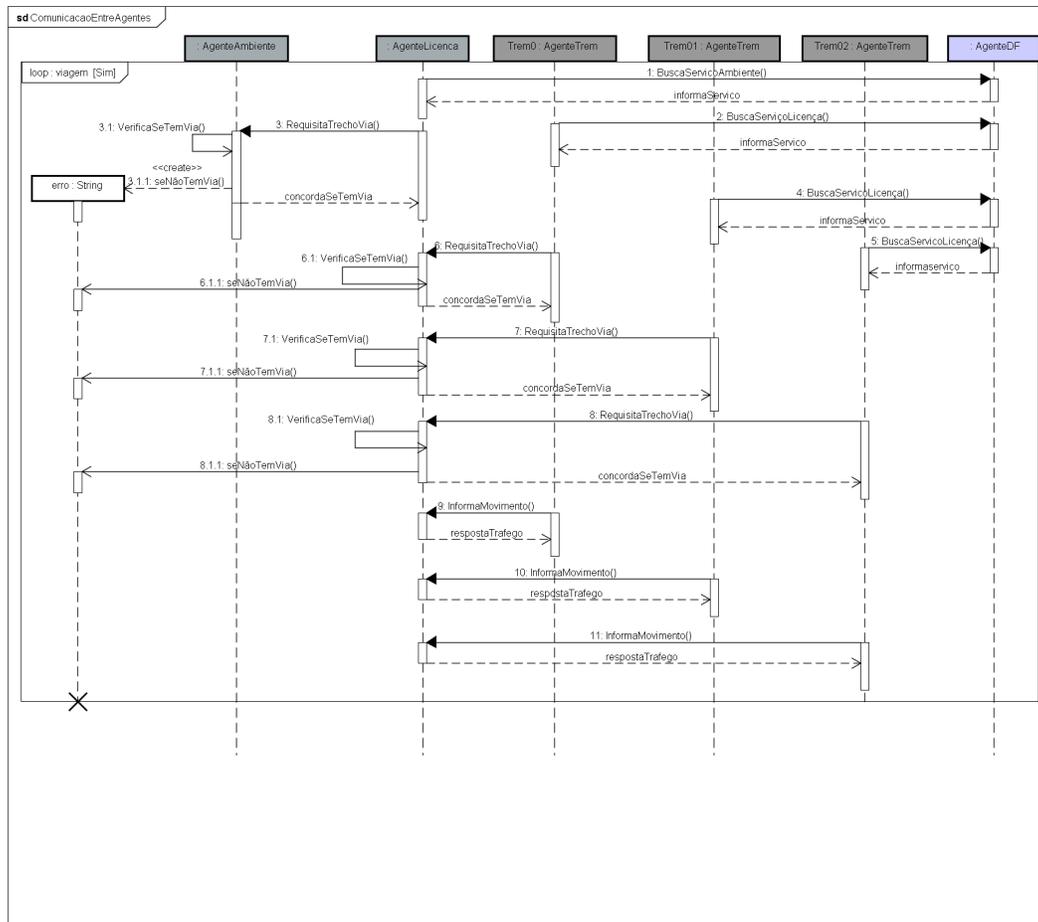


Figura 32 – Diagrama de interação entre os agentes.

Na Figura 32 cada agente que inicializa sua execução, cadastra o tipo de serviço oferecido juntamente ao responsável por relacionar os tipos de serviço do sistema multi-agente, chamado de *Agente DF (Directory Facilitator)*. Quando um agente entra em execução e necessita de um determinado serviço, então ele faz uma consulta ao agente de serviço *DF*. Após todas as obtenções do trecho de via férrea e permissões de entrada. O sistema se fecha em torno da viagem dos agentes de trem e o agente de licença.

Desse ponto em diante o agente de licença arbitrará as mensagens entre os agentes de trem que já possuem permissão e trafegam no trecho. Ele mantém a atenção a um ou mais pedidos de via e permissão de entrada no trecho, negando ou permitindo a entrada de um novo trem no trecho, caso haja capacidade para isso.

O formato das mensagens de movimento entre os agentes trens analisadas pelo agente de licença possuem o seguinte formato: “ *idTrem / pontoMedida / sentido / velocidadeAtual / tempoParaDesvio / aceleracao / comprimentoTrem / distanciaDesvio /*

velocidadeMaximaAtual / *velocidadeMaximaProjetadaAtual* / *tremAtras* / *tremFrente* / *entraDesvio* / *pedidoMudancaVelCruzeiro* / *pesoTrem* / *inicioTremSeguro* / *fimTremSeguro* / *ultrapassouAreaDeConflito* / *metragemTremDentroDesvio* / *metragemTremForaDesvio* / *prioridade* / *tempoRecalculadoParaPontoDeSeguranca* / *paradaEmergencia*”. Nessa “tupla” os valores remetidos possuem os seguintes significados:

- **idTrem:** número de identificação único de cada trem;
- **pontoMedida:** ponto de medida de 20 em 20 metros, onde está localizada a locomotiva líder de cada trem;
- **sentido:** direção do movimento de cada trem que relaciona a sua saída e chegada, onde o sentido direita pra esquerda significa movimento positivo, e da esquerda para a direita movimento negativo;
- **velocidadeAtual:** é a velocidade atual do trem em km/h ;
- **tempoParaDesvio:** é o tempo de chegada da locomotiva líder no ponto de medida que contém o início do desvio;
- **aceleração:** é o valor da aceleração do trem em m/s^2 ;
- **comprimentoTrem:** é o valor do comprimento do trem em m ;
- **velocidademaximaAtual:** é a velocidade máxima que está limitando o ponto de medida onde se encontra a locomotiva líder do trem, em km/h ;
- **velocidadeMaximaProjetadaAtual:** é a velocidade projetada entre 500 a 1500 metros à frente da posição da locomotiva líder em m ;
- **tremAtras:** valor contendo o id do trem que está atrás do trem que remete a mensagem, fornecendo ao trem destinatário da mensagem a percepção de mais um trem atrás do trem que está concorrendo ao recurso;
- **tremFrente:** valor contendo o id do trem que está à frente do trem que emite a mensagem, fornecendo ao trem destinatário da mensagem a percepção de mais um trem à frente do trem que está concorrendo ao recurso;
- **entraDesvio:** valor que indica ao agente de trem se ele deve entrar ou não no desvio a sua frente. Esse valor é apenas editado pelo agente de licença. Os agentes de trem só podem ler esse valor não tendo permissão para editá-lo;
- **pedidoMudancaVelCruzeiro:** esse valor é utilizado na coordenação das velocidades de cruzeiro ideais de dois ou mais agentes de trem. Onde, se

um dos agentes de trem não puder obter a velocidade que necessite para se coordenar com um trem concorrente ele editará esse valor a fim de avisar o outro agente de trem a impossibilidade de executar a velocidade tida como ideal no momento. Esse valor é utilizado caso um agente de trem esteja em um trecho com um perfil de via desfavorável a sua manutenção de velocidade, como um aclive muito forte;

- **pesoTrem:** é o peso referente ao trem em *toneladas*;
- **inicioTremSeguro:** é um valor que indica quando o início do trem está em uma área segura na passagem de uma zona de conflito onde: *zero (0)* seria início do trem ainda não seguro e *um (1)* início do trem em área segura;
- **fimTremSeguro:** é um valor que indica quando o fim do trem está em uma área segura na passagem de uma zona de conflito onde: *zero (0)* seria fim do trem ainda não seguro e *um (1)* fim do trem em área segura;
- **ultrapassouAreaDeConflito:** é o valor que indica se ambos valores *inicioTremSeguro* e *fimTremSeguro* já foram editados com o valor *um (1)* e se o trem já não estará em rota de entrada em outra área de conflito;
- **metragemTremDentroDesvio:** indica a porcentagem do trem que está dentro do desvio;
- **metragemTremForaDesvio:** indica a porcentagem do trem que está fora do desvio;
- **prioridade:** é a indicação de qual trem tem maior prioridade de tempo, em particular, quando o agente de licença tem a necessidade de se decidir por meio desse parâmetro a entrada no desvio;
- **tempoRecalculadoParaPontoDeDeguranca:** é o cálculo que o agente de trem realiza para estimar o provável tempo de chegada em um ponto ideal do desvio, em particular, quando para tal faz-se uso das velocidades máximas do trecho;
- **paradaEmergencia:** valor que indica ao agente de trem que ele deve executar uma parada de emergência devido a riscos no seu trajeto. Esse valor só pode ser editado pelo agente de licença, sendo que os agentes de trens podem somente ler esse valor. Os valores que são informados são:

zero (0) para trecho liberado, *um (1)* para risco eminente parada de emergência imediata e *dois (2)* para redução da velocidade para 5 km/h.

O conteúdo desta mensagem, após chegar ao agente de licença, é analisado por ele e remetido a outro agente de trem. A escolha é decidida em favor do agente de trem que esteja com o formula matemática de concorrer ao desvio; ou em rota de colisão; ou que esteja à frente ao mesmo sentido, como ilustra a Figura 33.

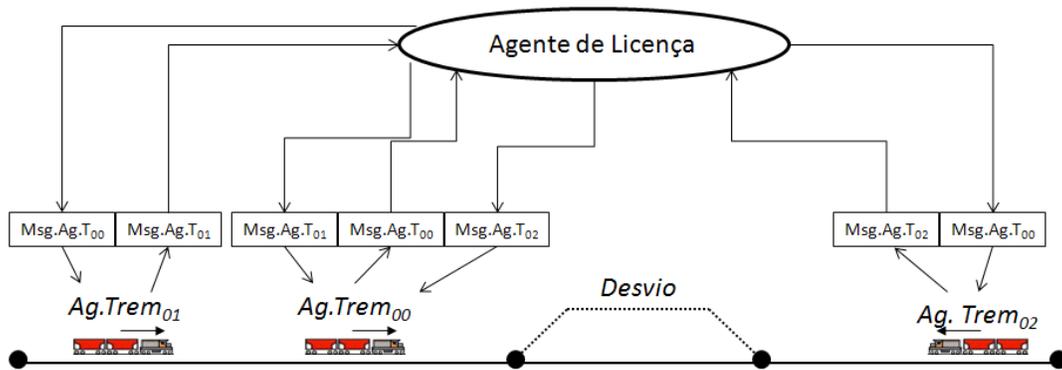


Figura 33 – Agente de licença e mensagens trocadas com os agentes de trem.

Na Figura 33 as mensagens são enviadas pelos agentes de trens remetentes e recebidas pelo agente de licença, e então enviadas para os agentes de trens destinatários. O agente de licença ao receber as mensagens edita os campos *entraDesvio* e *paradaEmergencia* com base na interpretação das mensagens de cada agente de trem.

Com esse formato de mensagens é possível fazer com que os agentes envolvidos no sistema multiagente obtenham os dados necessários para auxiliar os agentes de trem a alcançarem seus objetivos.

4.7. Definição das regras (Comportamentos)

Cada tipo de agente possui um conjunto de regras específicas. O agente de ambiente possui um conjunto bem reduzido regras, assim como, o agente de licença que possui um conjunto bem simples de regras relacionadas à arbitragem e distribuição de mensagens. O agente do tipo trem possui um módulo de software mais complexo devido a sua capacidade de condução e coordenação.

4.7.1. Atribuição das regras aos agentes

No sistema multiagente deste trabalho existem três tipos básicos de agentes, como mencionados anteriormente. Na sequência de execuções dos agentes, o agente com um conjunto de regras mais básicas é o agente de ambiente. Sua regra essencial seria a percepção de uma malha férrea formada por um conjunto de diversas rotas, essas rotas contêm diversos trechos. Neste sistema o agente de ambiente faz a percepção da malha e se cadastra com o agente de *DF* e fica na espera de uma comunicação para tomar a decisão sobre o trecho desejado pelo agente de licença que inicia a comunicação.

O próximo agente a iniciar sua execução será o agente de licença, sua inicialização é semelhante a do agente de ambiente, porém ele se cadastra com o agente *DF* e executa uma busca pelo serviço de ambiente, se encontrado, então o agente de licença requisita um trecho. Caso o agente de ambiente necessite de tal prestação de serviço, tal trecho é repassado ao agente solicitante, passando em seguida para a execução do agente de trem que estará prestes a entrar no trecho de domínio do agente de licença.

4.7.2. Regras dos agentes de licença

O agente de licença após todo seu processo de inicialização visto anteriormente na Figura 32, executa seu módulo de controle de mensagens e cálculos de tráfego para auxiliar o agente de trem no trajeto dentro do seu trecho de seu domínio. Esse agente também permanece com o seu módulo de permissão de entrada ativo na espera de uma solicitação de permissão. Ou seja, se o agente de licença percebe uma entrada no trecho, seu módulo de permissão é executado, ou se ele percebe uma movimentação, então seu módulo de auxílio à condução é executado. Na Figura 34 é ilustrada a forma de execução do agente de licença e seus módulos.

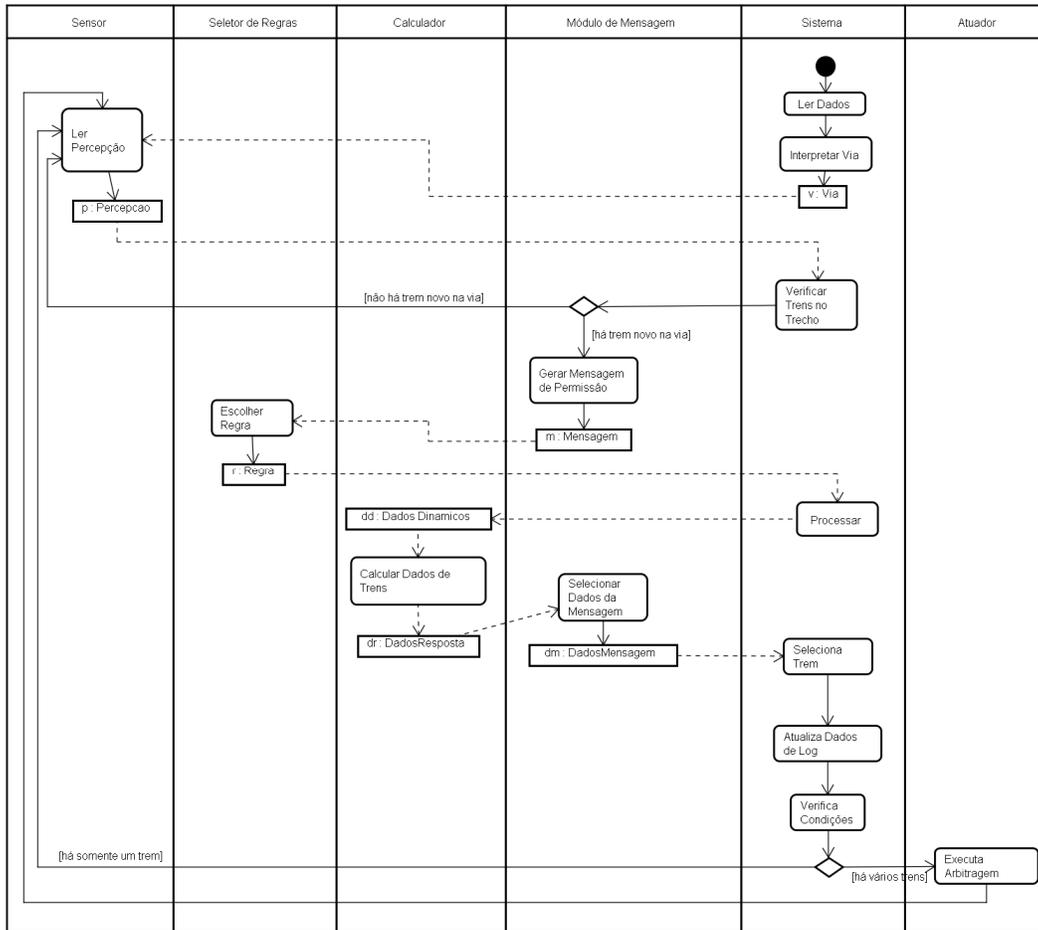


Figura 34 – Execução do agente de licença.

A Figura 34 ilustra a forma de execução do agente de licença, que fica em execução contínua devendo sempre estar pronto para receber novos agentes de trem no trecho, para monitorar, controlar e se comunicar com os agentes de trem já existentes no trecho.

4.7.3. Regras dos agentes de trem

O processo de execução do agente de trem, assim como do agente licença, tem a inicialização da sua comunicação ilustrada na Figura 32. Após a inicialização e a sua entrada permitida no trecho, o agente de trem executa a viagem no trajeto com base na execução ilustrada na Figura 35.

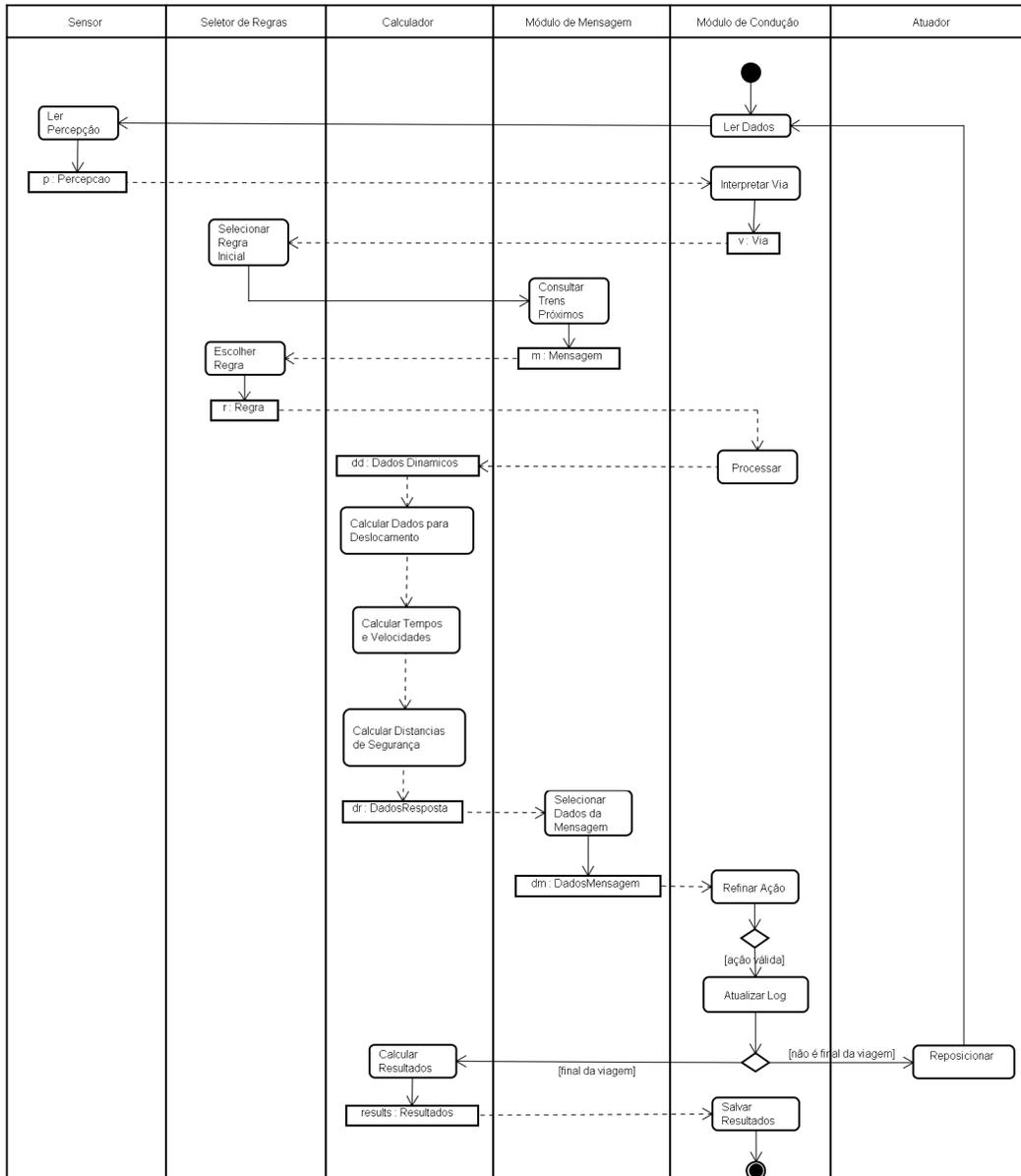


Figura 35 – Execução do agente de trem.

Na Figura 35 são mostrados vários módulos, dentre esses módulos o calculador é responsável pela execução das equações descritas neste trabalho e que vão da equação 2 a equação 21 exceto pela equação 17. No módulo calculador a equação 21 é utilizada com base no objetivo que o agente de trem seleciona. Esse objetivo pode ser a velocidade e/ou tempo de trajeto de um trecho selecionado. Esse trecho pode ser selecionado com base na necessidade do agente, essa necessidade pode ser o cálculo do tempo ou

velocidade para se chegar a um desvio com base no ponto onde se encontra o trem atualmente.

O reposicionamento do trem na via é obtido a cada 20 metros de deslocamento, esses 20 metros são o comprimento padrão de um ponto de medida da via férrea.

O agente a partir da descrição da viagem verifica continuamente se a velocidade está dentro do tempo com base na Equação 22, sendo esta a Equação 21 modificada.

$$V = \frac{S_t - S_a}{T_t - T_u} \quad (22)$$

onde:

- V é a velocidade media (em *m/s*);
- S_t é o deslocamento total do trecho (em *metros*);
- S_a é o deslocamento atual trecho (em *metros*);
- T_t é o tempo total estipulado (em *segundos*); e
- T_u é o tempo utilizado para o deslocamento (em *segundos*).

Com a Equação 22 o agente de trem é capaz de obter as velocidades ideais com a alteração do ponto de referência onde ele queira se basear. Tendo o foco do ponto de referência alterado, ele pode obter uma nova velocidade, que possibilite o seu deslocamento no tempo desejado.

A alteração do ponto de referência é mais uma verificação que o agente de trem executa entre tantas outras, tais como: monitoramento constante da velocidade de cruzamento; monitoramento do tempo de chegada no ponto de segurança; regras de segurança; pré-cálculos relacionados ao desvio; monitoramento de mensagens; aplicação de freio; consumo; entre outras.

Na Figura 36 é ilustrado o trecho utilizado por três agentes de trem com as percepções das velocidades máximas do trecho e a localização do desvio. É possível perceber as velocidades máximas que os agentes de trem possuem. Com essa informação, cada agente realiza um cálculo visando a melhor utilização do trecho, ou seja, um cálculo inicial prevendo o menor tempo possível de chegada no desvio em um ponto de segurança na área do desvio (cf. Figura 36), os pontos de segurança são locais seguros no qual cada trem não corre o risco de colidir-se com outro trem, conforme a Figura 38.

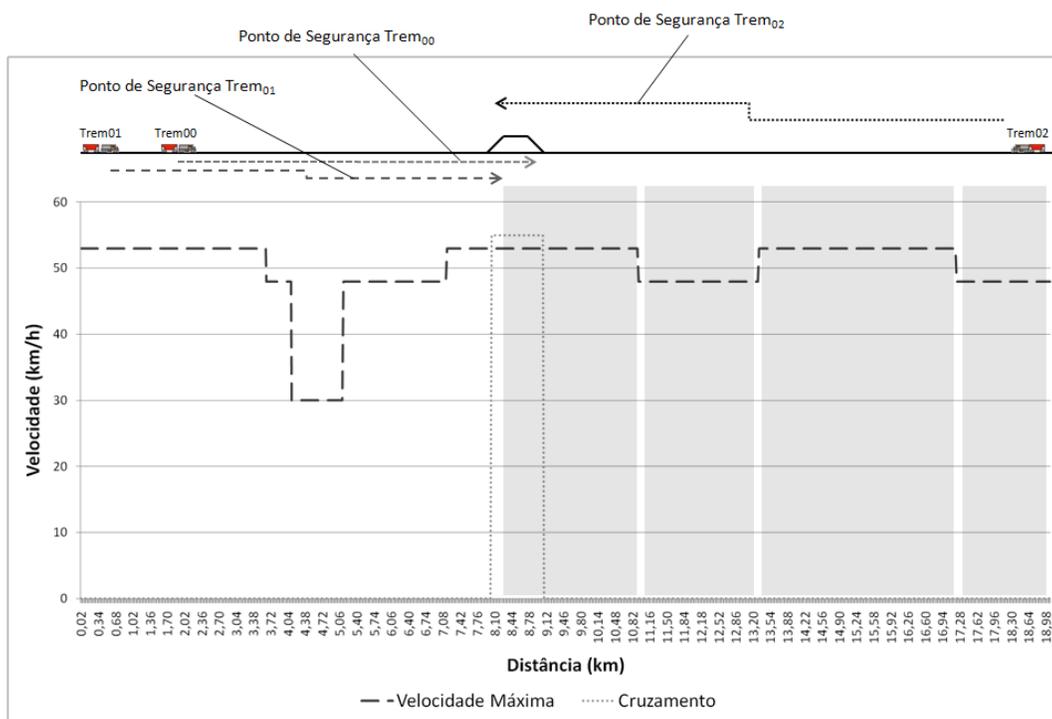


Figura 36 – Trecho utilizado pelos agentes.

O cálculo executado para essa finalidade é executado de forma fracionada, onde são selecionados os trechos em que a velocidade máxima se mantém constante. Após os cálculos dos trechos de velocidade máxima, o agente de trem soma esses tempos e armazena uma estimativa aproximada de chegada no ponto de segurança. A estimativa pode ser recalculada caso haja uma variação expressiva na alteração do tempo calculado, mas o agente de trem utilizará esse recurso em última instância para não forçar um recálculo de todos os trens envolvidos. Essa estimativa é encapsulada na mensagem que é propagada aos outros agentes do trecho. Na Figura 36 as regiões sombreadas indicam o cálculo fracionado executado pelo agente que conduz o *Trem02*.

Com o cálculo de melhor tempo de chegada no desvio, é possível iniciar a coordenação das chegadas dos trens de forma que todos os agentes envolvidos na condução dos trens, além de conseguirem uma ótima coordenação de chegada no desvio, consigam manter o melhor tempo de tráfego no trecho.

O agente de trem que recebe a informação de entrada em desvio pelo agente de licença calcula a entrada no desvio de forma segura, pois como já foi visto o aparelho de mudança de via que guia o trem até dentro do desvio não pode ser atingido com uma

velocidade superior a 15 km/h . Entretanto, neste trabalho foi estipulado ao agente de trem que essa entrada fosse executada em velocidade menor ou igual a 10 km/h . Os demais agentes de trem que não foram selecionados para entrar no desvio não necessitam passar pela área do desvio com velocidade inferior ou igual a 10 km/h .

O módulo de condução, juntamente com o módulo seletor de regras do agente de trem é responsável em selecionar a melhor decisão possível para a situação em que se encontra o agente de trem no trecho.

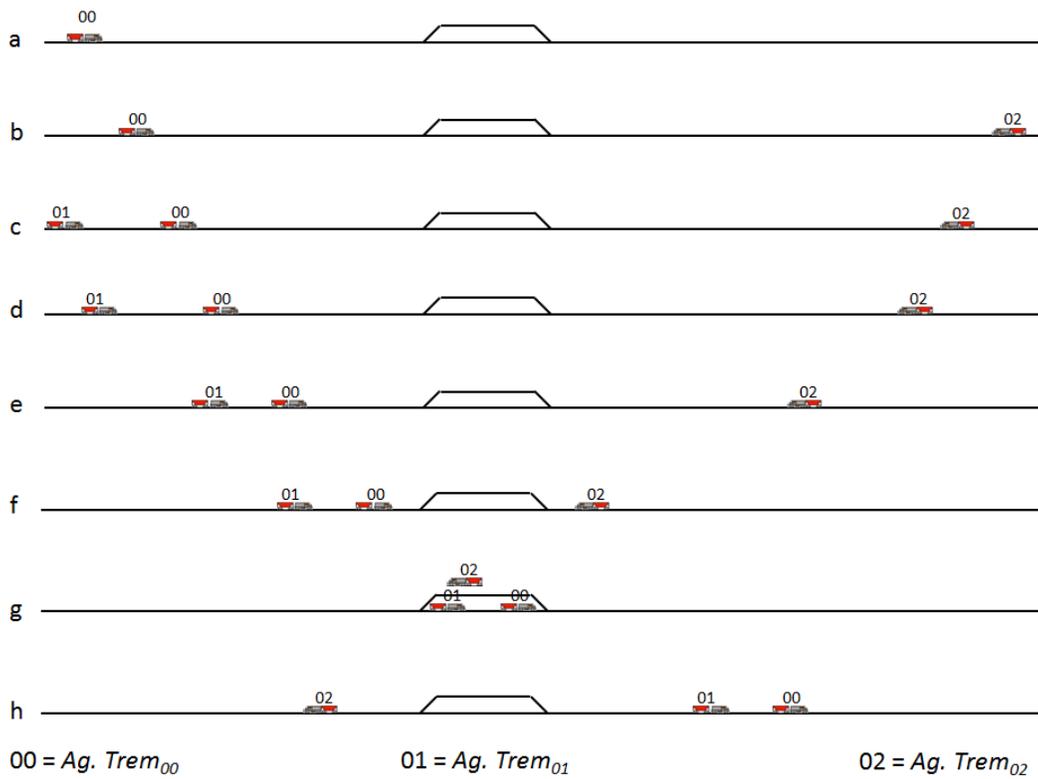


Figura 37 – Trecho utilizado pelos agentes com diversas situações.

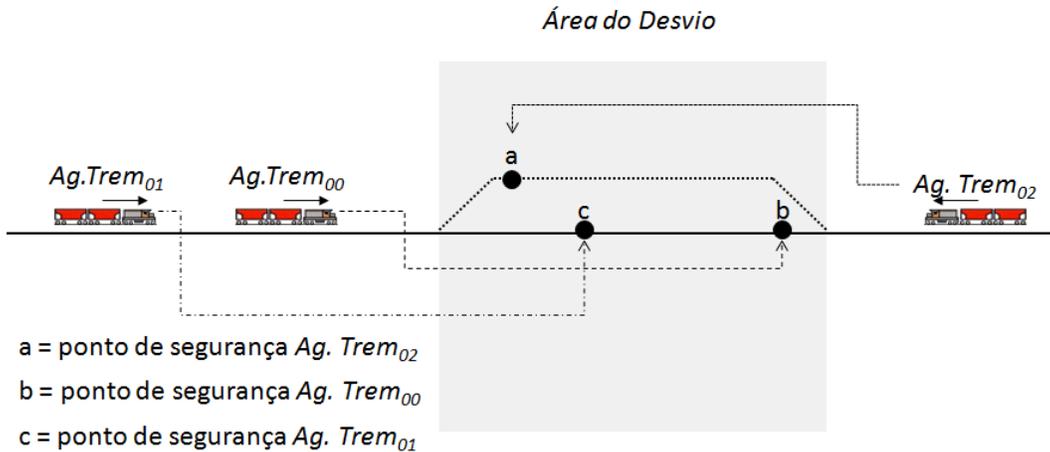


Figura 38 – Trecho utilizado pelos agentes com seus pontos de segurança calculados.

As regras selecionadas pelos agentes de trem são relativas às suas percepções diante das situações encontradas no trecho de via. Com base nas Figuras 33, 37 e 38 são apresentadas algumas situações em que ocorrem as seleções das regras de condução, tais como:

- **Condução com trecho livre à frente e atrás do trem:** nessa situação não há percepção de nenhum outro agente no trecho, pois o *Ag.Trem₀₀* seleciona uma regra de condução que executa apenas a velocidade de cruzeiro correta, concluindo desta forma todo o trecho no tempo estipulado no seu itinerário. Sua comunicação com o agente de licença nessa situação é feita de forma reduzida, limitando-se a indicar apenas sua presença e posição, como ilustra a Figura 37a;
- **Condução com a percepção de um trem à frente em sentido contrário:** nessa situação o *Ag.Trem₀₀* percebe o *Ag.Trem₀₂* em sentido contrário, nesse momento o *Ag.Trem₀₀* irá colocar em sua mensagem todas as informações referentes à sua condução e assim que o *Ag.Trem₀₂* receber essa mensagem ele fará a notificação do *Ag.Trem₀₀*. A reação dos agentes será negociar o tempo de melhor de chegada; para tal serão executados os cálculos como aqueles informados pela Figura 36. Assim, o agente de licença toma a decisão de entrada de desvio apenas pelo valor da prioridade de cada um dos dois agentes no trecho, como ilustra a Figura 37b;
- **Condução com a percepção de trem à frente em sentido contrário e trem atrás no mesmo sentido:** nessa situação o *Ag.Trem₀₀* percebe o

Ag.Trem₀₁ na sua traseira e informa tal fato ao *Ag.Trem₀₂*. Então, o agente de licença irá decidir que inevitavelmente o *Ag.Trem₀₂* terá que ir para o desvio. Se a distância em relação ao desvio do *Ag.Trem₀₂* for maior que do *Ag.Trem₀₀*, então o *Ag.Trem₀₂* irá efetuar uma condução mais agressiva para chegar com o mesmo tempo que o *Ag.Trem₀₀*, caso contrário o *Ag.Trem₀₂* irá conduzir suavemente, pois agora *Ag.Trem₀₀* tem o *Ag.Trem₀₁* atrás e não pode executar uma condução agressiva, como ilustra a Figura 37c. Em paralelo, a tal percepção os agentes calculam os tempos de chegada em seus respectivos pontos de segurança na área do desvio, como ilustra a Figura 38;

- **Condução com a percepção de trem no mesmo sentido à frente:** nessa situação o trem realiza o cálculo de chegada em seu ponto de segurança, monitorando continuamente o tempo e a distância de aproximação do último vagão do trem que está a sua frente. Isso é realizado mantendo uma distância de segurança calculada a partir do tamanho do trem mais o valor da distância de frenagem de emergência, já mencionadas no item 4.3.3 (Cálculos de frenagem). Essa situação é verificada nas Figura 37 e Figura 38 com relação ao *Ag. Trem₀₁* e *Ag. Trem₀₂*. Essa abordagem de condução é semelhante à técnica de seção de bloqueio móvel, tendo como um diferencial o cálculo feito entre a locomotiva líder do *Ag. Trem₀₁* com o último vagão do *Ag. Trem₀₀*. Desta forma pode-se evitar a perda relativa à bolha de segurança, conforme Figura 11, mostrada no método de seções móveis de bloqueio.

Existem várias outras regras que são executadas paralelamente com as regras citadas acima. Um exemplo seria o cálculo realizado pelo *Ag. Trem₀₂* que está designado a entrar no desvio e tem que fazer seu cálculo de tempo de chegada em seu ponto de segurança marcado com a letra *a* na Figura 38. Nesse cálculo ele deve levar em conta a restrição da velocidade de entrada no aparelho de mudança de via, que não pode ser atingido por um trem com velocidade superior a *15 km/h*.

Com essa restrição em suas regras, o agente deve fazer os cálculos de aproximação, tendo em vista o tempo de redução de velocidade de entrada no desvio. No caso deste trabalho foi estipulada uma velocidade de entrada de *10 km/h* evitando ao máximo

um risco de descarrilamento. A curva de redução desse processo é calculada com a distância de uma frenagem suave, ou seja, a frenagem com um valor médio em relação ao *PSI* utilizado.

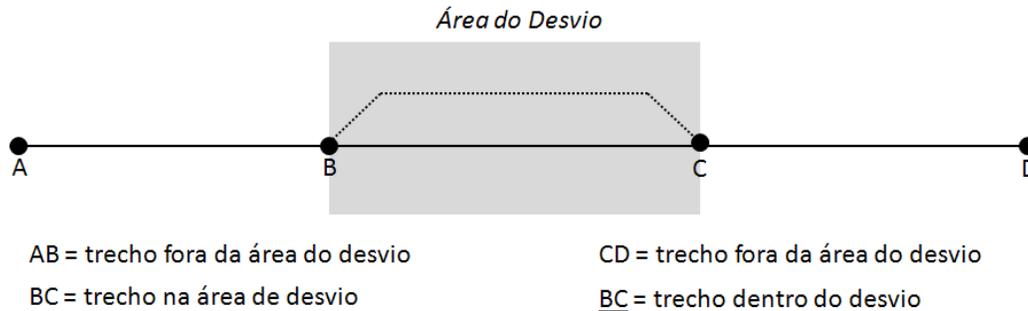


Figura 39 – Trecho de proximidade do desvio.

Outras regras utilizadas são relacionadas à condução dos trens na área do desvio, quando um agente de trem atinge a área do desvio como mostra a Figura 39, região sombreada, ele possui algumas situações como: entrar no desvio (trecho entre BC pontilhado); entrar na área do desvio (trecho entre BC contínuo); trafegar no desvio; trafegar na área do desvio; sair do desvio; sair da área do desvio e; afastar do desvio.

Essas situações geram novas entradas que são analisadas pelo agente gerando a seleção de regras referentes à área do desvio paralelamente às regras de condução, pois mesmo trafegando na área do desvio o agente de trem ainda pode possuir outro trem a sua frente e/ou na sua traseira com mesmo sentido, ou um trem à frente em sentido contrário.

Na Figura 37g é mostrada uma situação onde os três trens estão na área do desvio e não há risco de colisão frontal entre o *Ag.Trem₀₀* e o *Ag.Trem₀₂*. Porém, se o *Ag.Trem₀₁* ainda estiver em uma área de risco, ou seja, entrando na área do desvio, o *Ag.Trem₀₂* que estará trafegando dentro do desvio, mas especificamente na região BC, situação ilustrada na Figura 39, irá reduzir sua velocidade a um limite no máximo 5 *km/h*. Assim, o *Ag.Trem₀₁* solicitará ao *Ag.Trem₀₀* para aumentar sua velocidade evitando uma colisão entre à frente do trem conduzido pelo *Ag.Trem₀₂* e a traseira do trem conduzido pelo *Ag.Trem₀₁*.

No sistema, a troca de mensagens entre os agentes nas proximidades do desvio ocorre com um fluxo maior, ou seja, a cada deslocamento de 20 metros um agente de trem envia uma mensagem informando sua posição. Quando a proximidade do desvio

for superior a *1000 metros* as mensagens são trocadas a cada *100 metros*, e por fim quando a distância do desvio for maior que *5000 metros* as mensagens são trocadas a cada *500 metros*. Com essa abordagem de distâncias específicas nas trocas de mensagens, o agente de licença fica menos sobrecarregado nas futuras comunicações em um sistema maior, reduzindo assim os gargalos nas trocas de mensagens.

Nas regras de condução para a área do desvio, cada agente de trem recebe exatamente os valores referentes a tempo de entrada, saída e deslocamento na área do desvio ou dentro do próprio desvio dos outros agentes de trem envolvidos no trecho.

Com esses valores, um agente de trem pode calcular a velocidade ideal para percorrer o trecho dentro do desvio com o mesmo tempo de entrada em desvio de outro agente de trem. Ou seja, um agente de trem que está entrando no desvio passando do trecho DC para CB, conforme a Figura 39, calcula o tempo restante para estar totalmente em CB e o tempo exato para atingir o ponto B. Com isso outro agente que está passando do trecho AB para o trecho BC, como pode exercer uma velocidade superior à da entrada do desvio, percebe o tempo de trajeto do outro agente e pode utilizar esse tempo para calcular uma velocidade ideal de entrada, permanência e saída da área do desvio.

Para essas ações no desvio, o tempo utilizado por um trem não será exatamente o mesmo tempo utilizado pelo outro, pois será acrescido um tempo de segurança para essa ação. Assim, os agentes de trem podem executar um tráfego em toda a área do desvio evitando colisões e paradas desnecessárias.

O sistema executa vários cálculos de verificações na área do desvio, que é considerada uma área crítica. Porém, os cálculos antes da aproximação dos trens na área do desvio acabam por reduzir a necessidade dos agentes ficarem recalculando seus tempos (Figuras 36 e 38). Assim os agentes já possuem exatamente o tempo para chegarem a seus pontos de segurança (Figura 38). Os resultados obtidos nas simulações utilizaram poucos recálculos nas proximidades da área do desvio, pois, os cálculos de chegada nos pontos de segurança que foram executados antes da chegada obtiveram bons resultados.

4.8. Resultados

Os resultados que serão ilustrados na sequência referem-se a experimentos realizados em laboratório. Os resultados foram obtidos em três etapas:

- **Obtenção de resultados com base na forma de condução tradicional:** nessa etapa foram executadas três viagens, no qual foi verificado o pior caso, caso médio e melhor caso ocorridos na viagem em um trecho padrão;
- **Obtenção de resultados com base na execução do sistema multiagente:** nessa etapa o sistema foi executado para que na primeira simulação fosse alcançado o mesmo tempo máximo de viagem referente ao melhor caso da condução tradicional. Em seguida foram executadas outras seis simulações estipulando o tempo de viagem cada vez menor;
- **Comparação dos resultados:** nessa etapa foram feitas as comparações entre os resultados das viagens tradicionais com as viagens do sistema multiagente, verificando o quanto de economia de tempo e combustível foram obtidos.

4.8.1. Configurações dos trens

Os trens utilizados para as simulações dos resultados foram todos idênticos, formados pelos seguintes componentes:

- **Uma locomotiva modelo C30 com base nas informações da Tabela 3:** configurando então uma locomotiva com um peso total de *167,70 toneladas* e um comprimento de *20 metros*;
- **Quatorze vagões com base na Tabela 4:** configurando vagões com um peso unitário total de *80 toneladas* e um comprimento também unitário de *20 metros*.

Com os componentes indicados anteriormente, cada trem ficou configurado com *300 metros* de comprimento e um peso total de *1.289,70 toneladas*. Essa configuração de trem foi verificada com base nos comprimentos dos trens que descem a serra no trecho de Curitiba – Pr a Paranaguá – Pr.

4.8.2. Configurações da via

A via utilizada para as simulações teve sua distância total estipulada em 19 km com um desvio de 1 km com início localizado no quilômetro $8,4$ com sentido positivo do trajeto (direita para esquerda) e fim localizado no quilômetro $9,4$. Como mostra a Figura 40. Essa configuração foi aleatória, pois este trabalho visa à coordenação em um desvio, de forma que o comprimento total do trecho AD na Figura 40 poderá ser de qualquer magnitude.

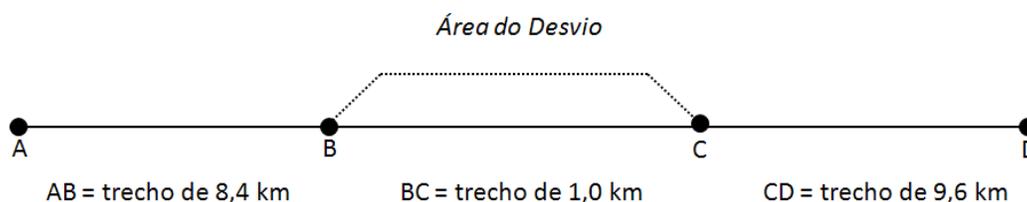


Figura 40 – Configuração da via férrea utilizada.

O trecho de via utilizado para simulação foi todo feito em nível, ou seja, os trens não tiveram que percorrer nenhum aclave ou declive. Porém, os agentes de trem suportam a condução nesse perfil de via.

4.8.3. Resultados das viagens simuladas com condução tradicional

A forma de simulação de uma viagem padrão foi baseada no tipo de estratégia utilizada pelas empresas de transporte ferroviário no que diz respeito a transporte de cargas. Foram feitas três simulações no trecho descrito na Figura 40 que foram nomeadas como: pior caso de uma viagem; caso médio de uma viagem; e melhor caso de uma viagem.

Todos os casos foram executados com três trens configurados como informado no item 4.8.1 e foram coletados de cada trem os valores de tempo total de viagem, velocidades utilizadas e o consumo de LTKB. A quantidade de trens na simulação foi estipulada com base na capacidade do desvio.

A simulação de pior caso foi elaborada com base em divisões do trecho em várias seções fixas de bloqueio. Tais seções de bloqueio tiveram uma extensão de 2 km cada, como ilustra a Figura 41.

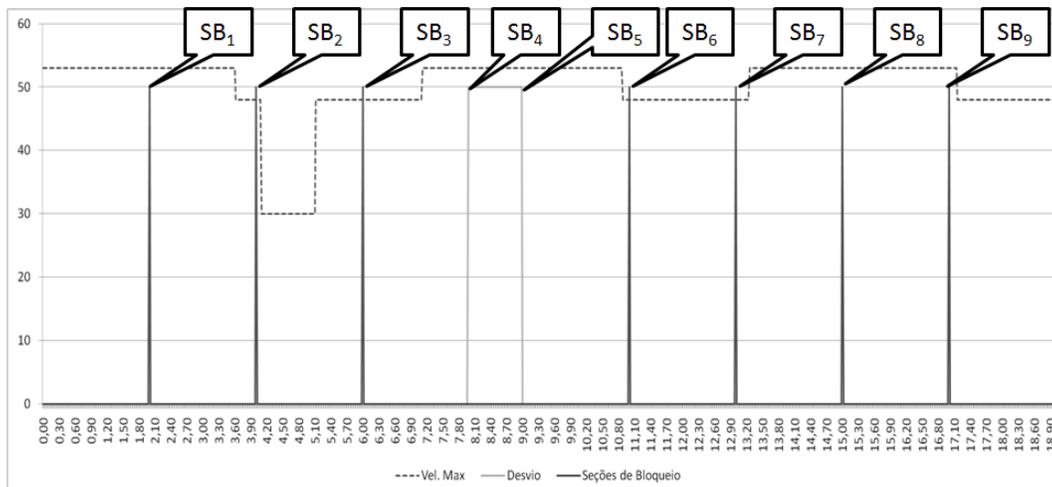


Figura 41 – Trecho utilizado para simulações com seções de bloqueio fixas (SBs).

Essa configuração tem por finalidade simular o tráfego dos trens utilizando o sistema *automatic train protected*, no qual cada trem tem por medida de segurança uma seção de bloqueio entre eles; esse método foi descrito no Capítulo 2.

Na simulação de pior caso: a ocorrência de pequenas paradas em todas as seções fixas de bloqueio são ilustradas na Figura 41. Com base nessa situação foram gerados os gráficos de tempos, velocidades, consumos e LTKB dessa simulação; ilustrados pelas Figuras 42, 43, 44 e 45 respectivamente.

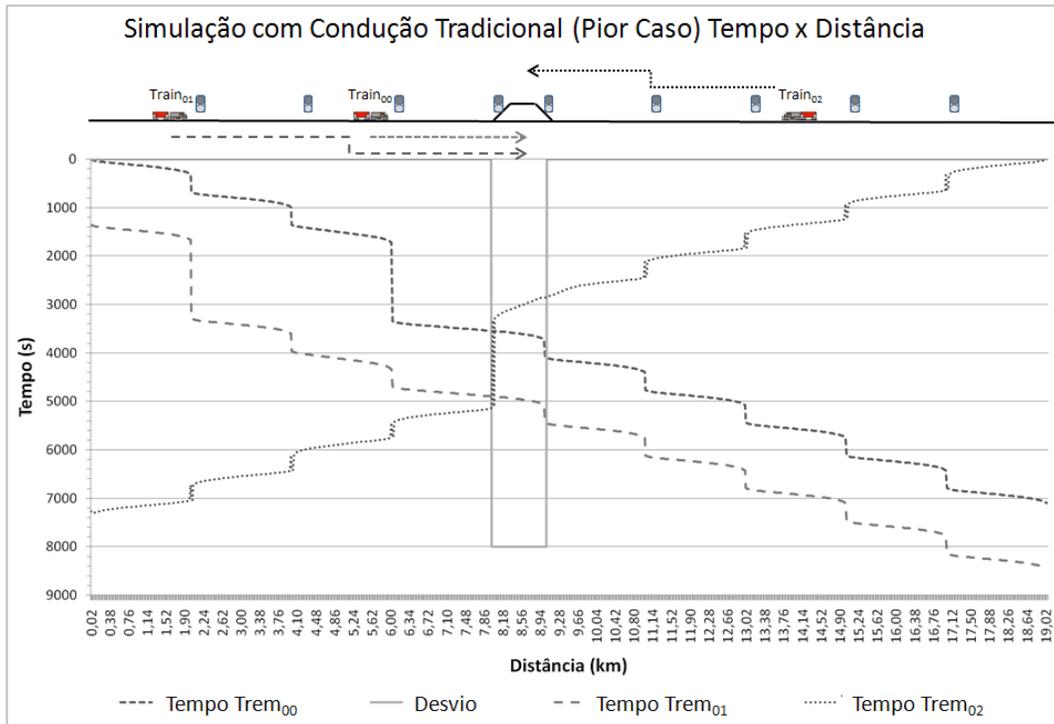


Figura 42 – Simulação do pior caso entre os trens (tempos dos trens).

Na Figura 42 os semáforos indicam as mesmas seções de bloqueio da Figura 41. A simulação inicia pelo *Trem₀₀* e *Trem₀₂* que entram ao mesmo tempo no trecho de domínio do agente de licença. Após, aproximadamente 1350 segundos o *Trem₀₁* entra no mesmo trecho. Todos os trens param exatamente 360 segundos em cada semáforo ou seção de bloqueio. Porém, quando o *Trem₀₂* se aproxima da área do desvio ele reduz sua velocidade e pára na seção de bloqueio com a numeração 4 (*SB₄*), conforme Figura 41. Essa manobra é feita pelo *Trem₀₂* tem um tempo determinado e com isso o *Trem₀₀* obrigou-se a aguardar na *SB₃*. Como consequência o *Trem₀₁* também ficou em espera na *SB₁*, visto que as regras do sistema *automatic train protection* sempre implicam em uma seção de bloqueio entre trens do mesmo sentido.

Após o *Trem₀₂* parar na *SB₄*, o *Trem₀₀* e *Trem₀₁* iniciam a movimentação para passarem pela área do desvio e com isso o *Trem₀₂* ficará parado aguardando essa passagem. Somente depois que o final do *Trem₀₁* estiver finalizado a passagem pela *SB₄* é que o *Trem₀₂* novamente entrará em movimentação.

Os tempos de parada de maior monta de cada trem foram 1620, 1620 e 1800 segundos entre os trens denominados de *Trem₀₀*, *Trem₀₁* e *Trem₀₂* respectivamente. Nessa simulação o tempo de viagem utilizado para a comparação será o tempo total da viagem

do último trem a sair do trecho, que no caso dessa simulação foi de 8452 *segundos* exercidos pelo *Trem₀₁*.

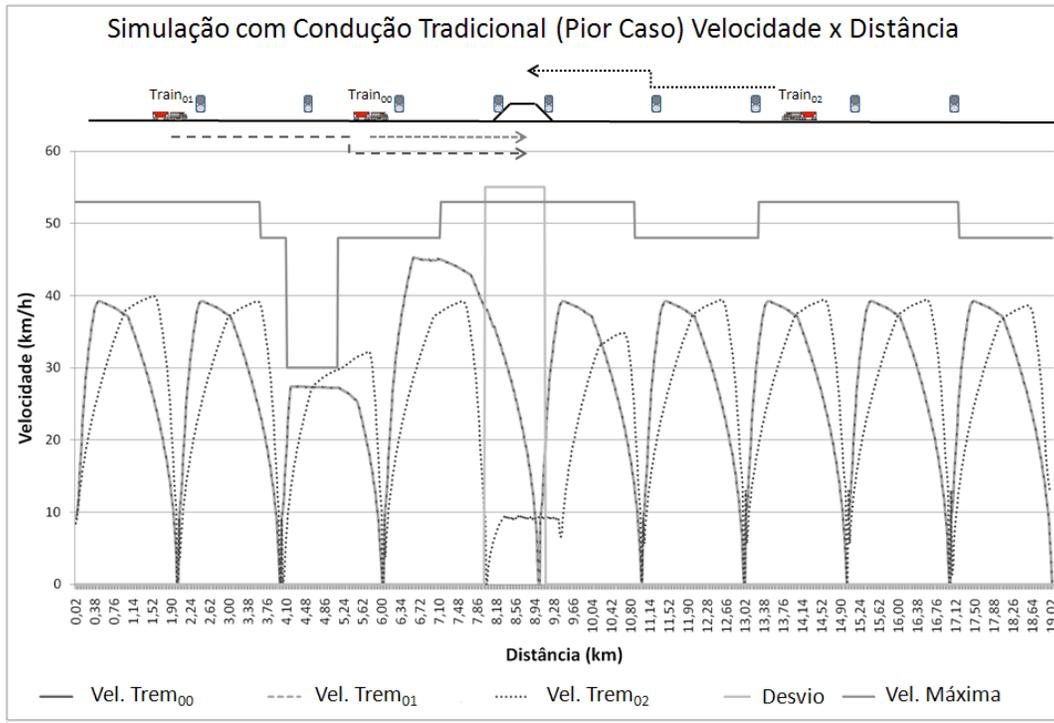


Figura 43 – Simulação do pior caso entre os trens (velocidades dos trens).

Na Figura 43 são ilustradas as velocidades desenvolvidas pelos trens envolvidos, no qual se pode observar que nenhum trem ultrapassou da velocidade máxima do trecho, e que a velocidade do *Trem₀₂* foi no máximo 10 *km/h* dentro do desvio.

Os trens não conseguiram atingir a velocidade máxima de cada seção de bloqueio, pois, devido ao tamanho restrito de 2 *km* o trem antes mesmo de obter a velocidade máxima da seção de bloqueio, tem que iniciar o processo de frenagem suave para conseguir a parada no final da seção de bloqueio que ele trafega.

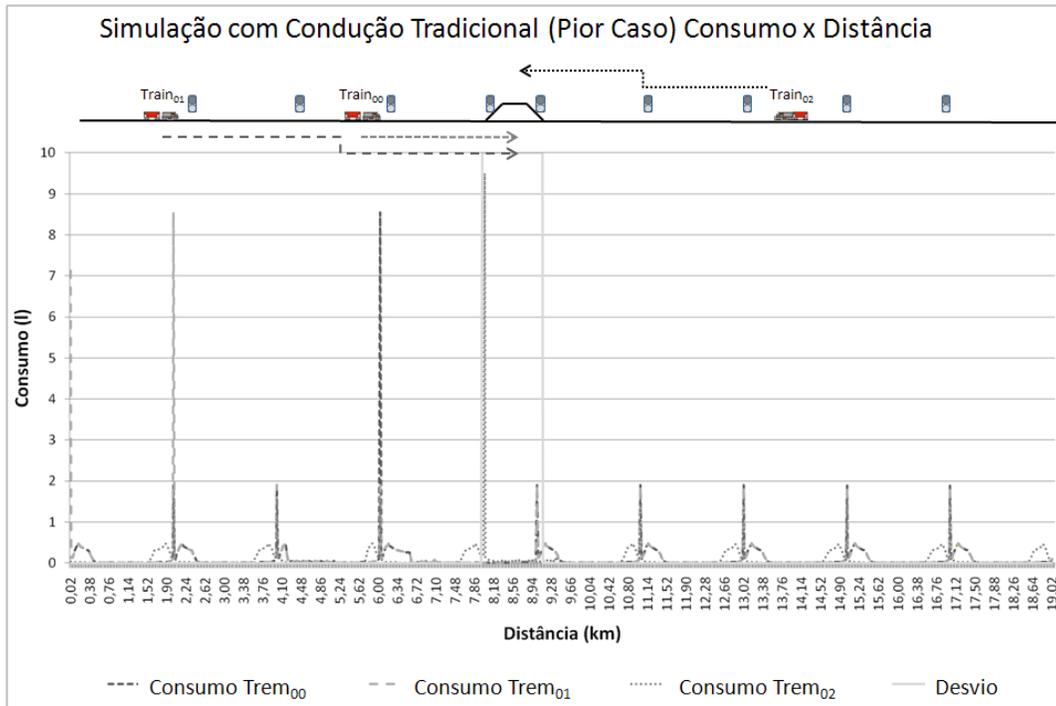


Figura 44 – Simulação do pior caso entre os trens (consumos dos trens).

Na Figura 44 são evidenciados que os pontos de maior consumo, cujos pontos são exatamente onde os trens ficaram parados, sendo 8,55; 8,55 e 9,6 a quantidade em litros consumidos pelas paradas dos trens *Trem₀₀*, *Trem₀₁* e *Trem₀₂* respectivamente.

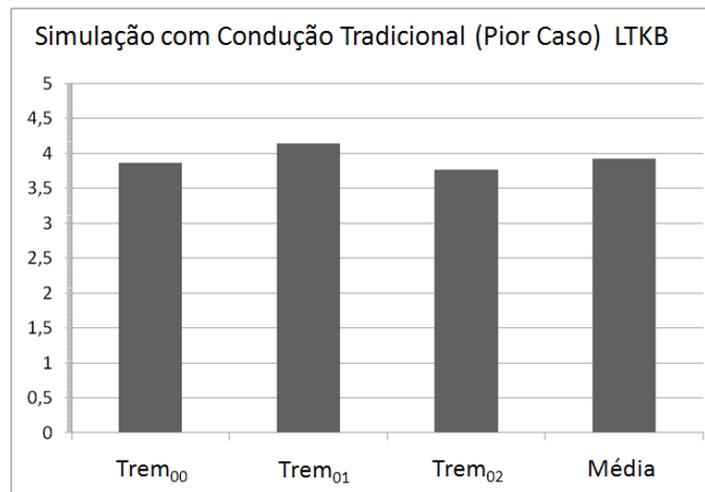


Figura 45 – Simulação do pior caso entre os trens (consumos dos trens LTKB).

Na Figura 45 são ilustrados os consumos em LTKB de cada um dos trens. O LTKB médio entre eles, cujo valor aproximado foi de 3,92. Pode-se então verificar que o *Trem₀₁* foi o que teve o maior consumo da viagem devido ao maior número de paradas.

Na simulação do caso médio: diferentemente do caso anterior, os trens envolvidos não efetuam as paradas em todas as seções de bloqueio, mas apenas reduzindo a velocidade próxima a tais seções. Porém, inevitavelmente eles necessitam parar em alguns pontos da via.

As reduções feitas nos finais das seções de bloqueio podem ser vistas como uma autorização dada no momento que o trem estaria próximo do final da seção de bloqueio. Com base nessa situação foram gerados os gráficos de tempos, velocidades, consumos e LTKB dessa simulação, ilustrados pelas Figuras 46, 47, 48 e 49 respectivamente.

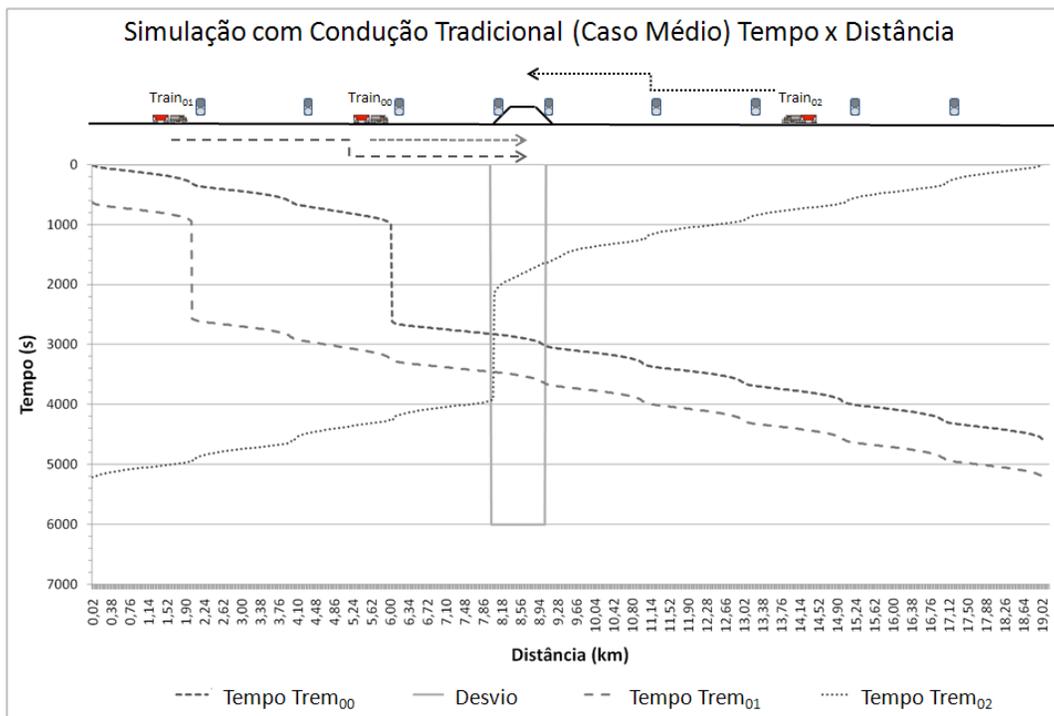


Figura 46 – Simulação do caso médio entre os trens (tempos dos trens).

Conforme mostra a Figura 46 os pontos de paradas de maior tempo de cada trem são mantidos. As ondulações nas curvas de tempo indicam uma redução de velocidade quase tendendo a zero. Porém, antes de finalizar a parada cada trem recebe autorização

para ultrapassar para seção de bloqueio subsequente. Nessa simulação os tempos de parada dos trens foram 1600, 1600 e 1800 segundos.

As três paradas de maior duração são necessárias pelos mesmos motivos da simulação do pior caso; elas seguem o nível de segurança imposta pelo sistema *automatic train protection*. O tempo máximo de viagem foi de 5212 segundos exercidos pelo *Trem₀₂*.

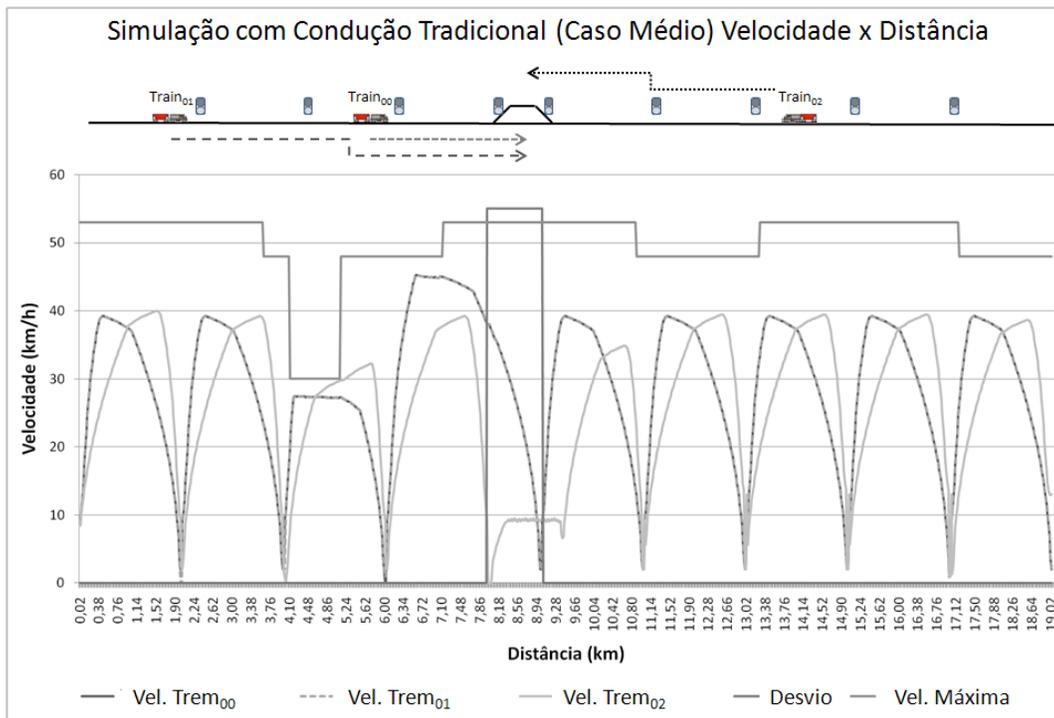


Figura 47 – Simulação do caso médio entre os trens (velocidades dos trens).

Na Figura 47 são ilustradas as velocidades desenvolvidas pelos trens envolvidos, notando que novamente nenhum trem ultrapassou a velocidade máxima do trecho, e a velocidade do *Trem₀₂* foi no máximo 10 km/h dentro do desvio.

Os trens novamente não conseguiram atingir a velocidade máxima de cada seção de bloqueio, pois, devido ao tamanho restrito de 2 km o trem antes mesmo de obter a velocidade máxima da seção de bloqueio obrigou-se a iniciar o processo de frenagem suave para conseguir a redução de velocidade no final da seção de bloqueio que ele trafega.

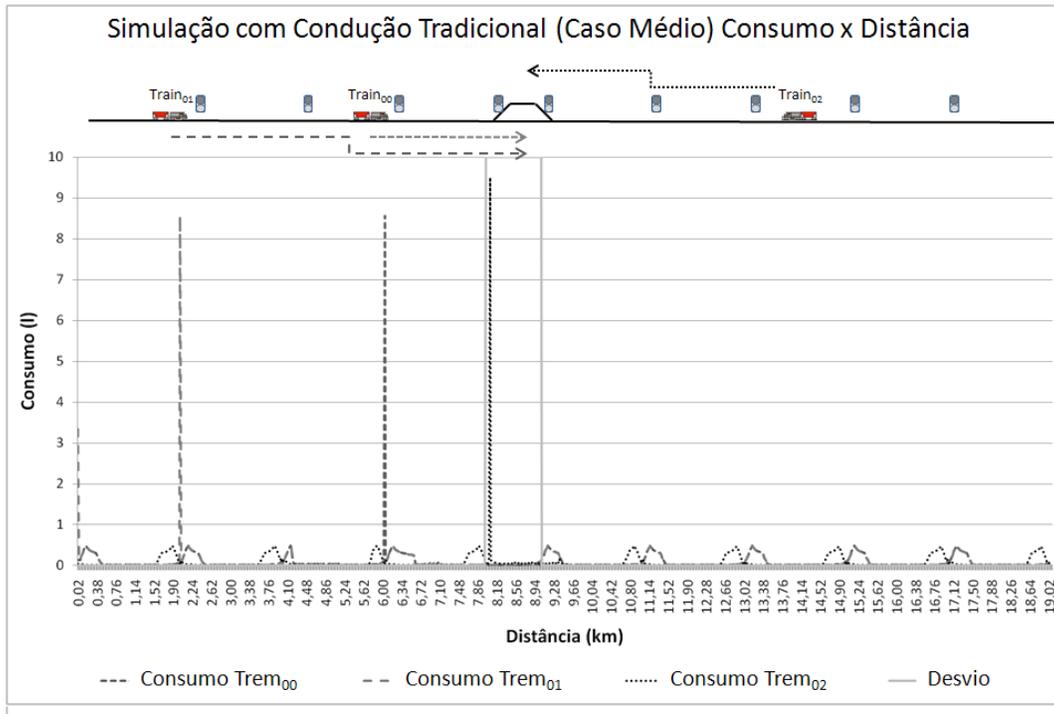


Figura 48 – Simulação do caso médio entre os trens (consumos dos trens).

Na Figura 48 são evidenciados que os pontos de maior consumo são exatamente os pontos onde os trens ficaram parados, sendo 8,55; 8,55 e 9,6 a quantidade em litros consumidos pelas paradas dos trens denominados de *Trem₀₀*, *Trem₀₁* e *Trem₀₂* respectivamente. Também na Figura 48 pode ser notado que o consumo nas seções de bloqueio onde não houveram paradas, mas apenas uma redução da velocidade próxima a zero. Os picos de consumo foram bem reduzidos. Entretanto, ainda há um consumo relativamente mais alto devido à aceleração, para novamente retomar a velocidade de cruzeiro.

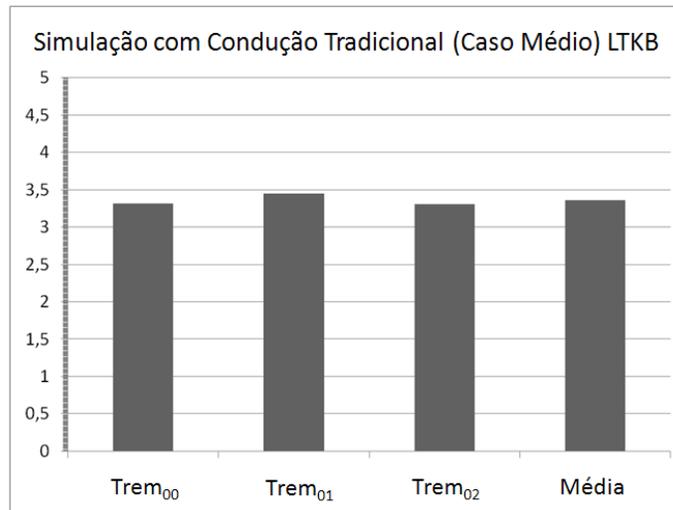


Figura 49 – Simulação do caso médio entre os trens (consumos dos trens LTKB).

Na Figura 49 são ilustrados os consumos em LTKB de cada um dos trens e o LTKB médio entre eles, cujo valor foi de aproximadamente 3,36. Pode-se então verificar que o *Trem₀₁* foi o que teve o maior consumo da viagem devido ao maior número de paradas. Porém, todos os consumos já foram menores que a simulação de pior caso, devido a não ocorrência de paradas em todas as seções de bloqueio.

Na simulação do melhor caso: os trens envolvidos só efetuam a parada nas seções de bloqueio necessárias para a coordenação, pois essas seções são de grande importância para os trens ajustarem seus tempos de chegada e saída dos desvios sem que haja um acidente. Os trens denominados *Trem₀₀*, *Trem₀₁* e *Trem₀₂* deverão manter suas paradas nas *SB₃*, *SB₁* e *SB₄* respectivamente. A Figura 50 ilustra a variação da distância sendo nula e a do tempo não nula.

Com base nessa situação os gráficos de tempos, velocidades, consumos e LTKB dessa simulação são ilustrados pelas Figuras 50, 51, 52 e 53 respectivamente.

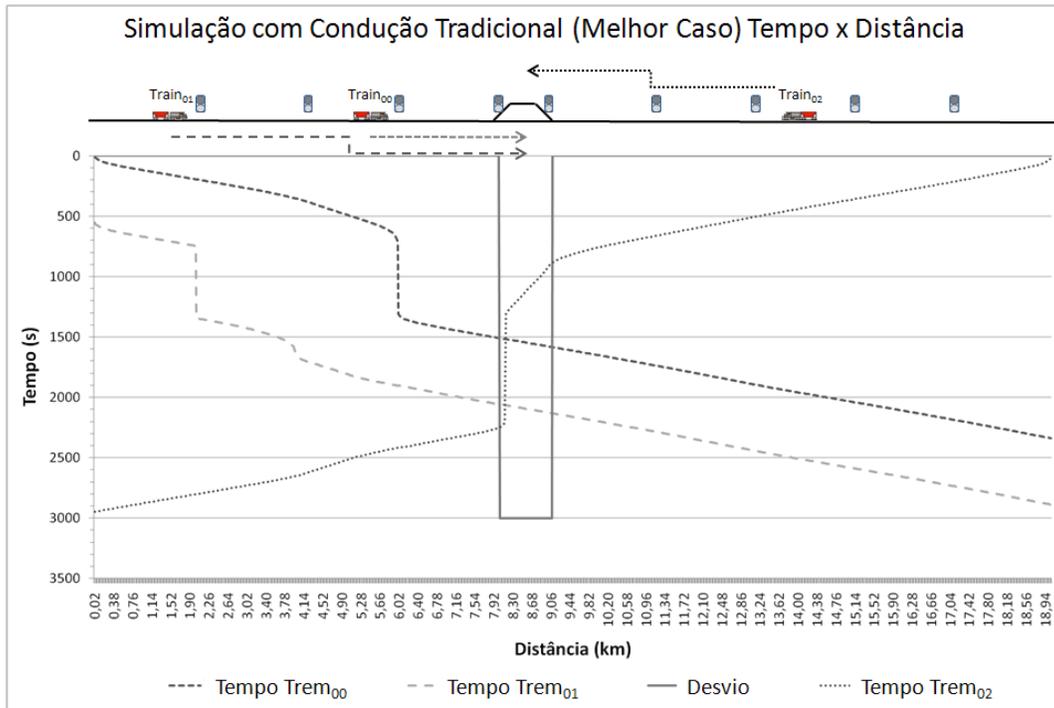


Figura 50 – Simulação do melhor caso entre os trens (tempos dos trens).

Na Figura 50 os pontos de paradas com maior duração de cada trem foram mantidos novamente, porém, não houve mais as ondulações nas curvas de tempo que indicavam uma redução de velocidade quase tendendo a zero. Os tempos de parada dos trens foram de 600, 600 e 900 segundos.

As três paradas de maior duração foram necessárias devido ao nível de segurança imposta pelo sistema *automatic train protection* e também pelo modo que as empresas do setor ferroviário utilizam uma via férrea singela. O tempo máximo de viagem foi de 2947 segundos realizados pelo Trem₀₂.

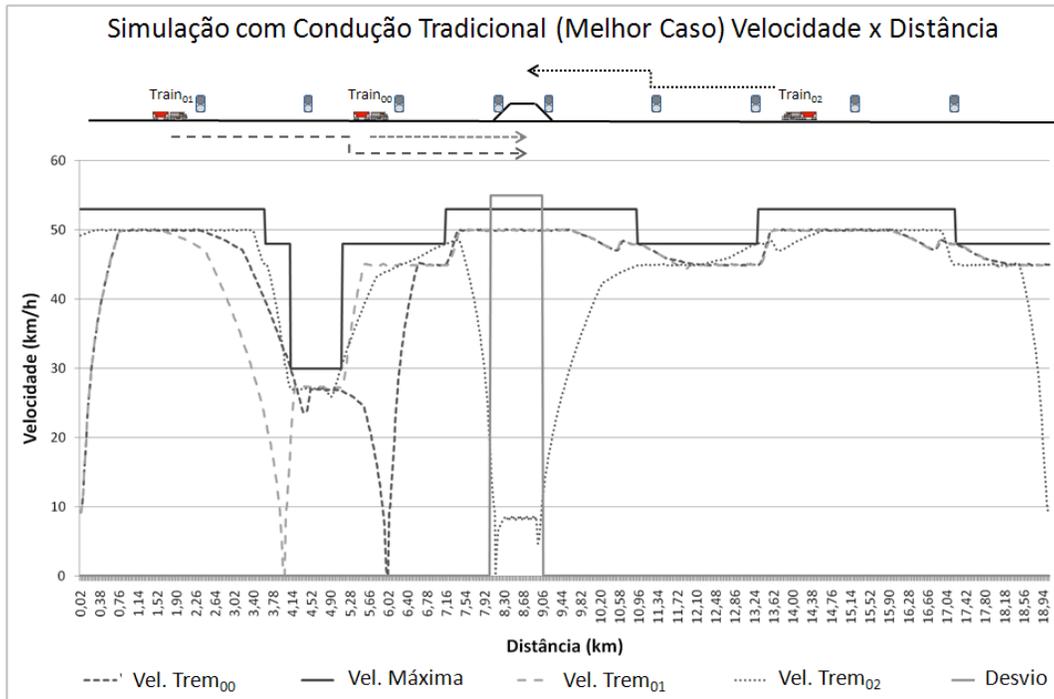


Figura 51 – Simulação do melhor caso entre os trens (velocidades dos trens).

Na Figura 51 já não se verificam as reduções de velocidade nas seções de bloqueio. Cada trem efetua somente uma parada sendo estes, em pontos semelhantes às outras simulações anteriores. Ainda assim, os trens seguem o nível de segurança imposto pelo *automatic train protection*. Pode-se notar na Figura 51 que todos os trens conseguiram obter a velocidade máxima do trecho em alguns pontos da via, respeitando as velocidades máximas, principalmente pelo Trem₀₂ que fez uma redução até 10 km/h para obter a velocidade de segurança sobre o aparelho de mudança de via localizado no início do desvio.

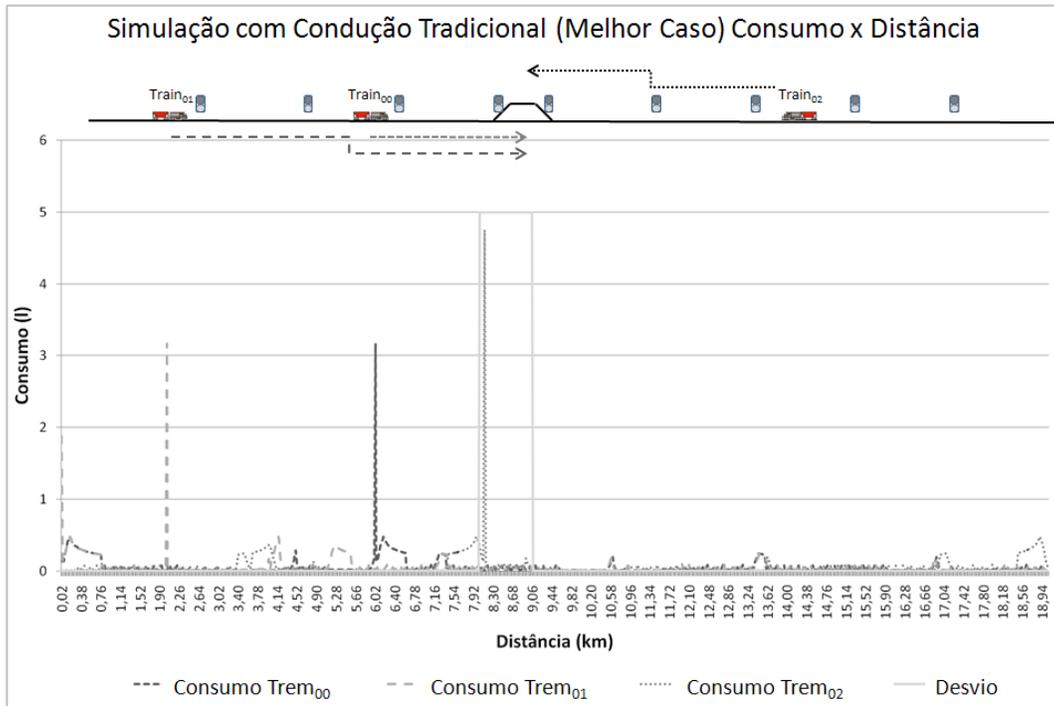


Figura 52 – Simulação do melhor caso entre os trens (consumos dos trens).

Na Figura 52 é possível ver uma grande redução nos consumos, pois, cada trem fez apenas uma parada e essa parada foi com um intervalo de tempo menor. Os mais elevados pontos de consumo foram 3,2; 3,2 e 4,76 litros dos trens identificados como *Trem₀₀*, *Trem₀₁* e *Trem₀₂* respectivamente.

Na Figura 52 é possível notar uma grande perturbação na curva de consumo onde as paradas ocorreram. Tal perturbação acontece pelo alto consumo dos motores das locomotivas na retomada da velocidade.

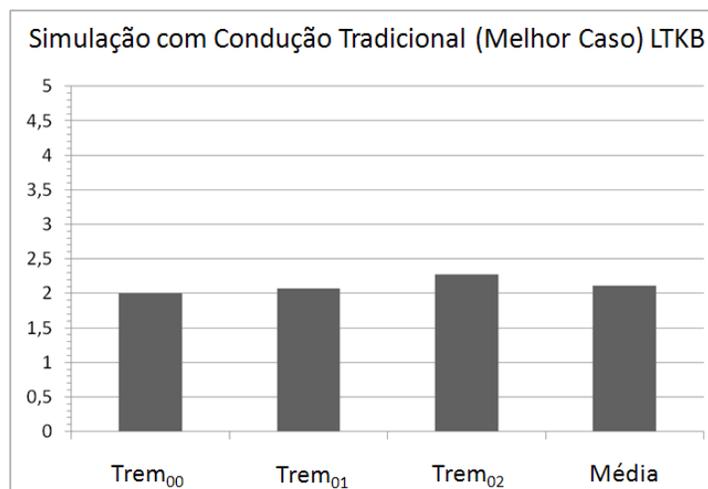


Figura 53 – Simulação do melhor caso entre os trens (consumos dos trens LTKB).

Na Figura 53 são ilustrados os consumos em LTKB de cada um dos trens com o LTKB médio entre eles de aproximadamente 2,11. Pode-se então verificar que o *Trem₀₂* foi o que teve o maior consumo da viagem, porém, todos os consumos já foram menores que a simulação de caso médio, devido também ao menor número de paradas.

Com base nas simulações realizadas em relação a uma condução de trem tradicional, que visa respeitar os sistemas de condução mostrados no Capítulo 2, é possível verificar a redução de consumo a partir do momento que as paradas dos trens são reduzidas.

4.8.4. Resultados das viagens simuladas pelo sistema multiagente

Os resultados das simulações realizadas pelos agentes no sistema são feitos de forma a contrapor o resultado de melhor caso de condução tradicional. A primeira simulação do sistema multiagente foi disparada para conseguir o mesmo tempo de viagem total do melhor caso da viagem tradicional, realizada em 2947 *segundos*.

Após a primeira simulação com um tempo máximo estipulado de 2947 *segundos*, foram executadas mais seis simulações partindo do tempo de viagem de 2800 *segundos* até 2300 *segundos* com redução de 100 *segundos* entre cada simulação. Nesse trabalho serão evidenciados os resultados da viagem de comparação com o mesmo tempo de melhor caso e o resultado da viagem de menor tempo executada pelo sistema multiagente.

O sistema multiagente obteve com sua execução uma distância de segurança entre os dois agentes que conduzem os trens que estão trafegando no mesmo sentido. Com essa distância de segurança alcançada, esses dois trens praticamente ocupam o trecho de via férrea como se fosse apenas um trem maior. Devido a esse resultado, a capacidade da via acaba se elevando proporcionalmente sua quantidade de trens que podem ser inserido com o mesmo sentido e o tamanho do desvio no trecho.

Na execução com o tempo de 2947 segundos o sistema multiagente conseguiu finalizar a viagem no tempo de aproximadamente 2944 segundos, bem próximo ao tempo do melhor caso da viagem tradicional.

Com base nessa situação foram gerados os gráficos de tempos, velocidades, consumos e LTKB, mostrados nas Figuras 54, 55, 56 e 57 respectivamente.

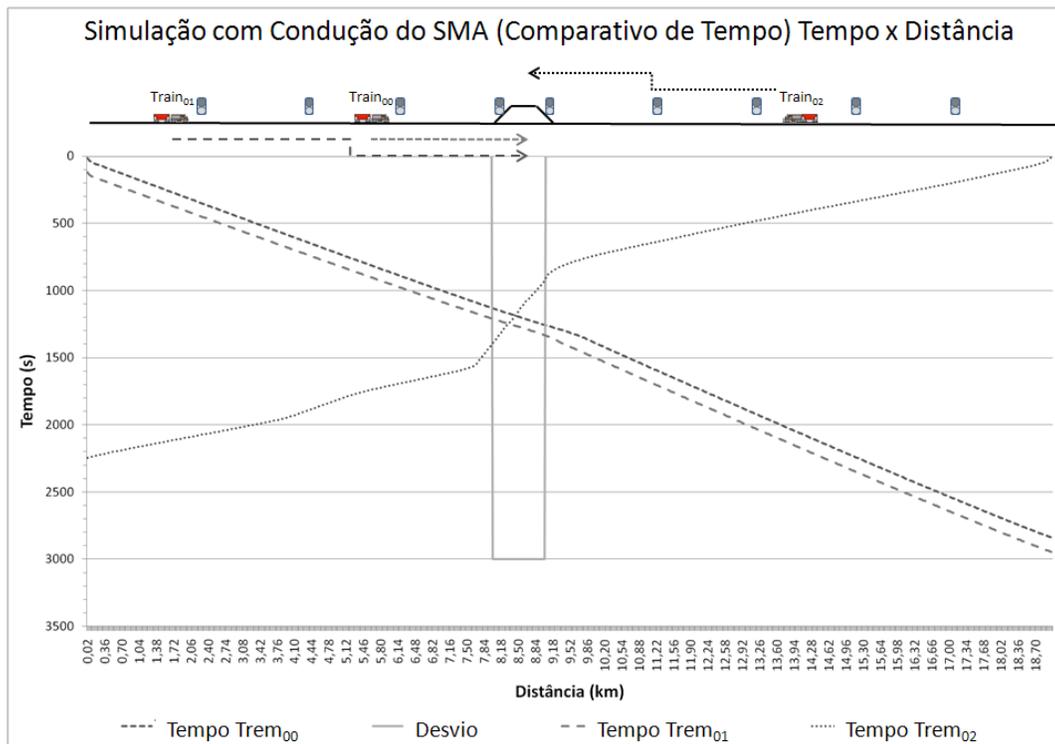


Figura 54 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (tempos dos trens).

Na Figura 54 é ilustrada a viagem no trecho de domínio do agente de licença, onde fica evidenciado o trajeto de todos os trens sem que nenhum deles tenha efetuado uma parada. É também possível verificar que os trens denominados de *Trem₀₀* e *Trem₀₁* mantêm uma distância segura entre eles.

A distância de segurança segue os cálculos de tamanho do trem mais a distância de frenagem de emergência, ou seja, o $Trem_{01}$ tem seu tamanho total calculado mais a soma da frenagem de emergência verificadas no item 4.3.3 desse trabalho. Na execução foi verificado que a distância de segurança variou entre 500 e 700 metros.

O monitoramento da distância de segurança pelo sistema multiagente extinguiu a forma de condução com seções de bloqueios, porém, é possível verificar certa semelhança entre a forma de condução com seções de bloqueios móveis.

Ainda na Figura 54 é verificado que o $Trem_{02}$ que faz a passagem no desvio, eleva um pouco mais o seu tempo de desvio. Isso ocorre devido à redução da velocidade para um limite máximo de 10 km/h. Essa velocidade executada no desvio pelo $Trem_{02}$ pode ser vista na Figura 55.

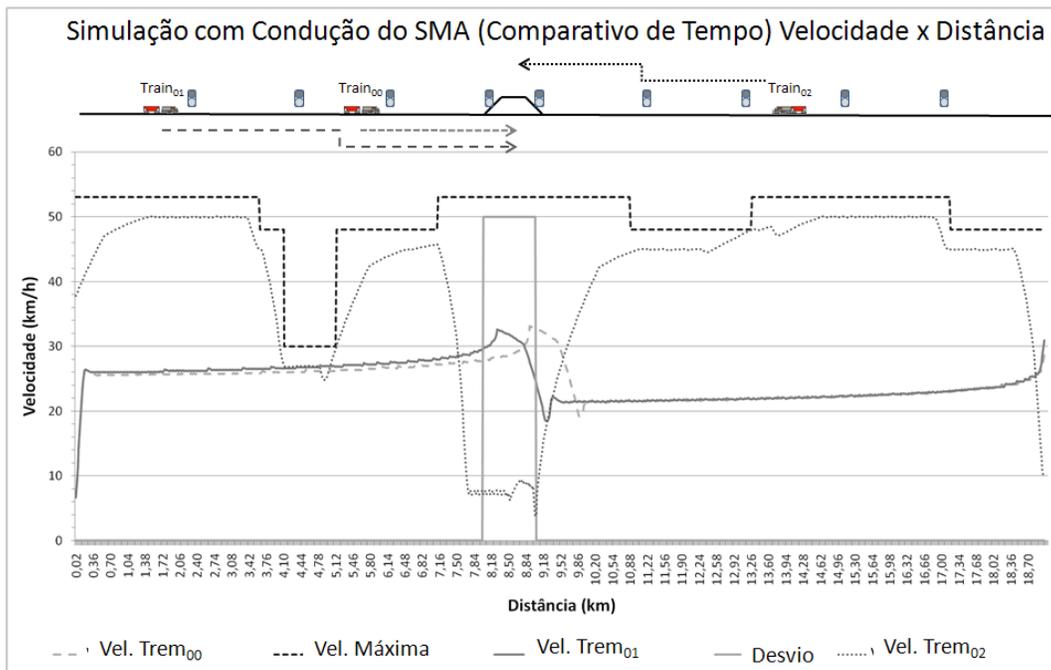


Figura 55 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (velocidades dos trens).

Na Figura 55 é possível verificar a redução de velocidade do $Trem_{02}$ dentro do desvio, onde foi realizada uma forte frenagem que chegou a reduzir a velocidade próximo a 5 km/h. Logo após, houve uma retomada da velocidade por intermédio dos cálculos realizados, com base nos tempos e velocidades dos outros trens que estavam em sentido contrário. Após a retomada, o $Trem_{02}$ manteve sua velocidade próxima a 8 km/h

permitindo assim, tempo suficiente para que o *Trem₀₁* finalizasse sua entrada na área do desvio.

Outra situação verificada na Figura 55 são as velocidades dos trens denominados *Trem₀₀* e *Trem₀₁*, eles alcançaram a melhor coordenação possível com base no tempo total que teriam para completar a viagem, calculando também corretamente suas chegadas aos pontos de segurança mostrados na Figura 38.

As velocidades do *Trem₀₀* e *Trem₀₁* permaneceram sempre dentro de uma velocidade média. A curva de velocidade alcançada por esses trens permanece com o mesmo padrão, sendo ela uma curva de baixo consumo de combustível. Outra observação com respeito a tal curva de velocidade é que quando ela é alcançada o agente de trem está realizando o objetivo da viagem de forma mais otimizada possível.

O *Trem₀₂* não obtém a mesma curva de baixo consumo. Ele foi obrigado a executar uma condução mais agressiva devido a alguns fatores, tais como: estar mais distante do desvio que os outros trens em sentido oposto; não ter nenhum trem no mesmo sentido e trafegar de forma a buscar sempre as velocidades máximas do trecho e; ter ainda que executar uma redução mais acentuada de velocidade para entrar no desvio com velocidade de segurança.

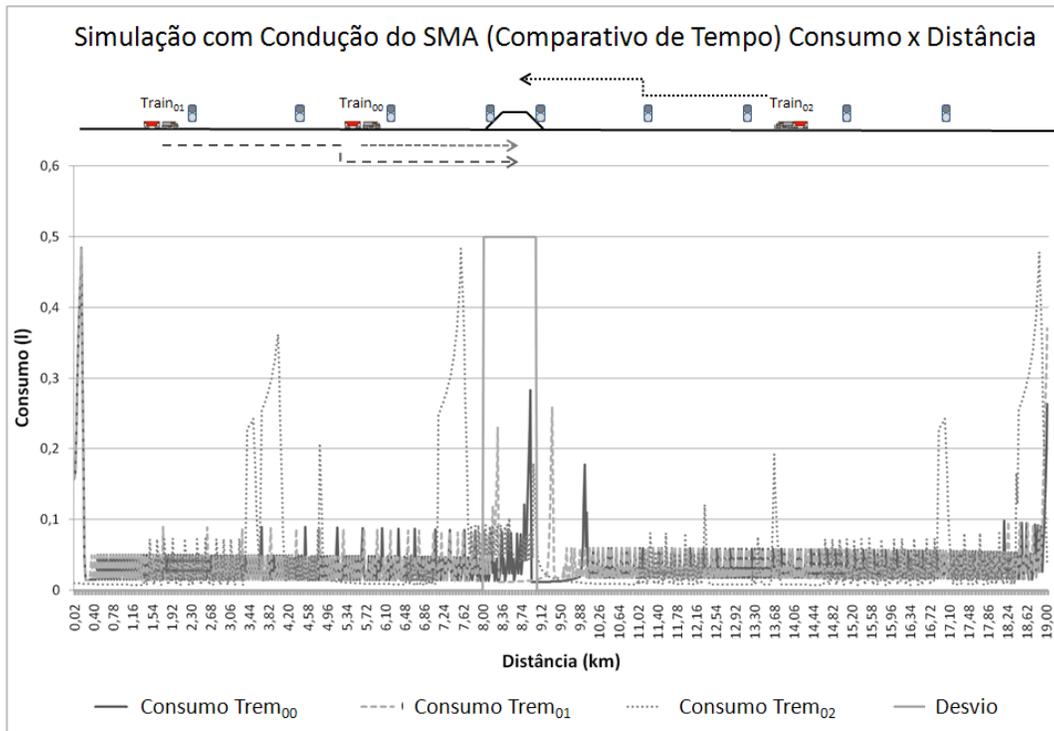


Figura 56 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (consumos dos trens).

Na Figura 56 é verificado que o *Trem₀₂* consumiu mais combustível justamente pela condução mais agressiva para assegurar a chegada no tempo correto ao seu ponto de segurança. Cabe ainda lembrar que o trecho percorrido pelo *Trem₀₂* até o ponto de início do desvio é maior que o trecho percorrido pelos *Trem₀₀* e *Trem₀₁*.

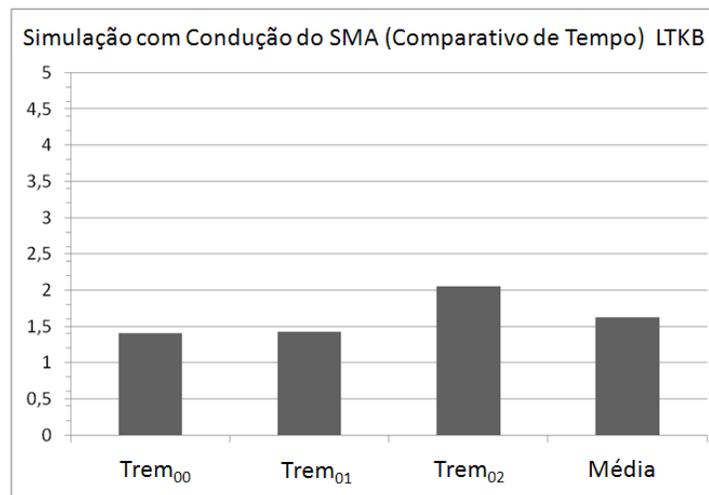


Figura 57 – Simulação do SMA para viagem de 2947s (consumos dos trens LTKB).

Na Figura 57 são ilustrados os consumos em LTKB de cada um dos trens com o LTKB médio entre eles de aproximadamente 1,63. Pode-se então verificar que o *Trem₀₂* foi o que obteve maior consumo devido à condução mais agressiva. Porém, o LTKB médio de 1,63 obtido foi bem mais baixo que o LTKB do melhor caso da condução tradicional com um valor de 2,11.

O sistema obteve uma redução de 23% no consumo médio, tendo efetuado a viagem com o tempo total praticamente igual ao tempo da viagem tradicional. Essa economia se deu pelo fato de dois trens conseguirem a curva padrão de velocidade praticamente em todo o trajeto, além de não ter ocorrido nenhuma parada na simulação.

Na próxima simulação foi executada uma viagem com um tempo máximo de 2300 segundos.

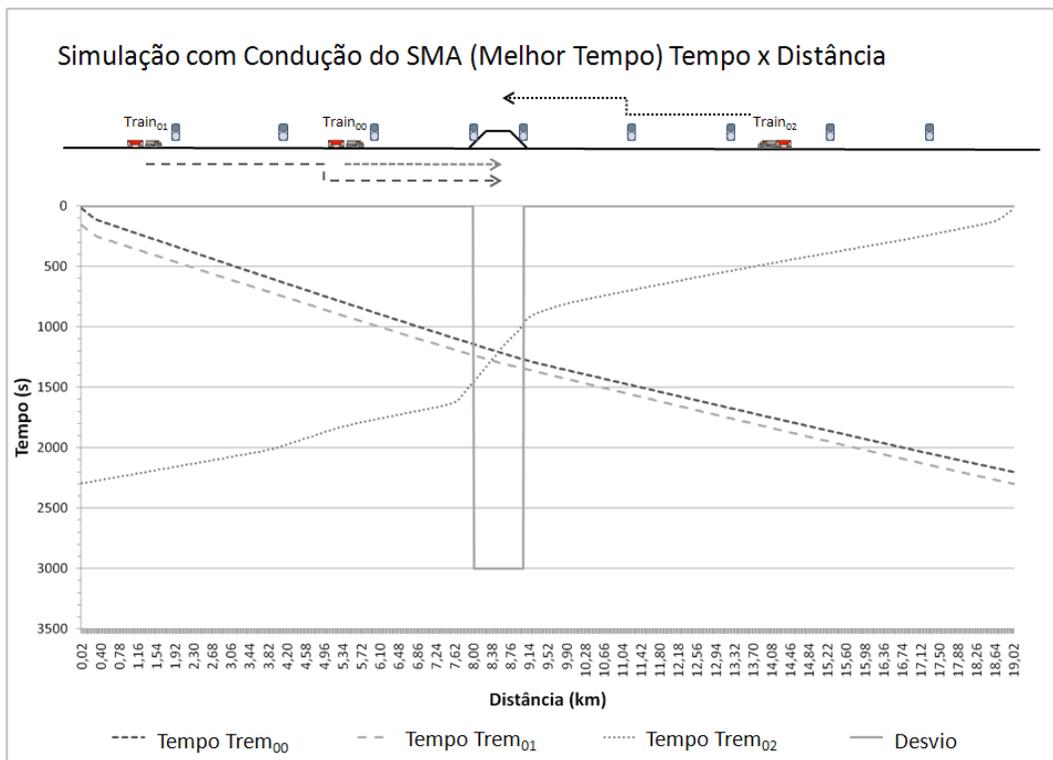


Figura 58 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (tempos dos trens).

Na Figura 58 também é verificada a distância de segurança entre os trens denominados *Trem₀₀* e *Trem₀₁*, tendo a mesma variação em torno de 500 a 700 metros. O sistema obteve uma coordenação para o trajeto sem a execução de paradas por nenhum

dos trens envolvidos; a viagem foi realizada com um tempo total de aproximadamente de 2299 segundos.

Nessa execução o *Trem₀₂* foi novamente o que teve o maior consumo de combustível, devido a uma condução mais agressiva pelo agente que o conduziu. Essa condução proporcionou velocidades próximas às máximas do trecho, pois, novamente o agente do *Trem₀₂* teve a necessidade de acelerar mais para conseguir tempos semelhantes de chegada ao seu ponto de segurança localizado dentro do desvio.

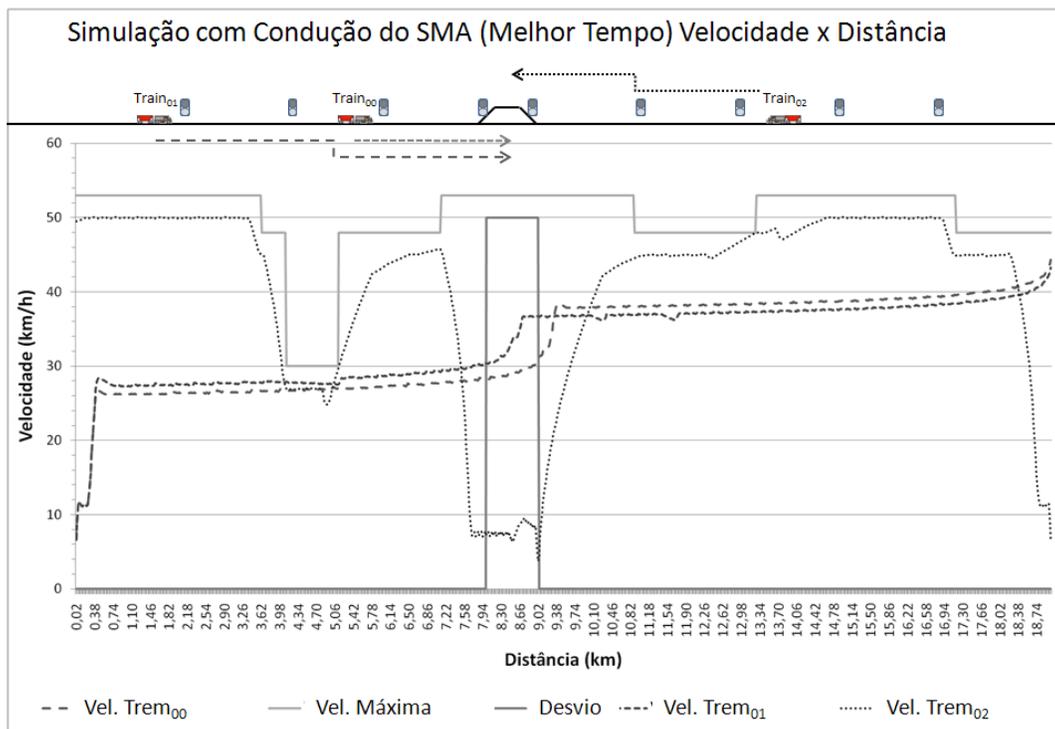


Figura 59 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (velocidades dos trens).

Na Figura 59 é notada a alta velocidade do *Trem₀₂*, porém, nunca ultrapassando a velocidade máxima do trecho. Na chegada ao desvio o *Trem₀₂* iniciou uma frenagem suave para uma entrada em desvio com velocidade inferior a 10 km/h, seguindo corretamente as restrições de segurança.

Pode-se notar também que os trens denominados *Trem₀₀* e *Trem₀₁* obtiveram uma curva de velocidade semelhante à primeira viagem de comparação, sendo essa curva de grande economia de combustível. Porém, após a saída do desvio, ambos *Trem₀₀* e *Trem₀₁* elevaram a sua velocidade para finalizar a viagem no tempo estipulado de 2300 segundos.

Os $Trem_{00}$ e $Trem_{01}$ teriam ainda capacidade para finalizar a viagem em um tempo ainda menor que 2299 segundos. Porém, o $Trem_{02}$ não teria possibilidades de executar o seu trajeto em um tempo inferior a 2299 segundos devido às restrições de velocidade máxima após sua saída do desvio como ilustra a Figura 59.

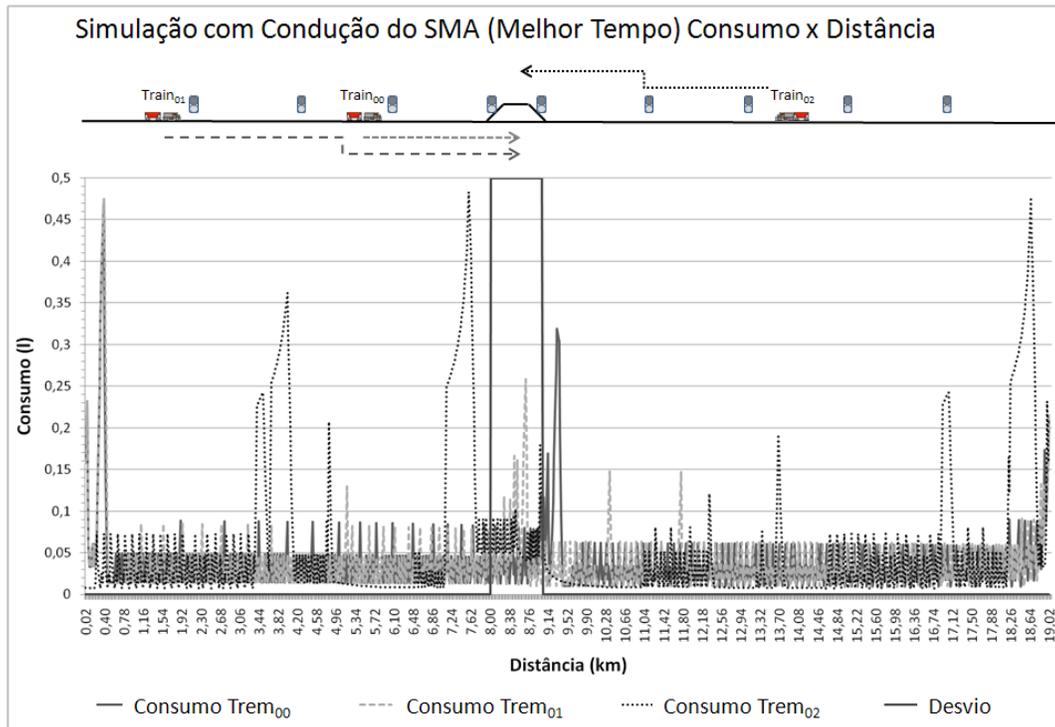


Figura 60 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (consumos dos trens).

Na Figura 60 é verificado um consumo mais alto que a primeira viagem de comparação, pois, com o tempo mais reduzido de viagem o consumo de combustível tende a crescer. Com a redução desse tempo houve um crescimento mínimo de consumo, tendo a viagem de comparação uma duração total de 2944 segundos e consumindo um total médio em LTKB de $1,63$, e para outra viagem uma duração total de 2299 segundos e consumindo um LTKB médio de $1,66$.

Esse consumo maior em detrimento a uma viagem mais curta deve ser analisado pelas empresas de transporte para optarem entre uma viagem com um tempo maior e menos consumo, ou uma viagem com um tempo menor e maior consumo. Mas como foi verificado o consumo com a condução exercida pelos agentes foi reduzido mesmo com um acréscimo no tempo final de viagem; a grande economia de combustível é garantida pelo sistema que eliminou as seções de bloqueio e paradas desnecessárias.

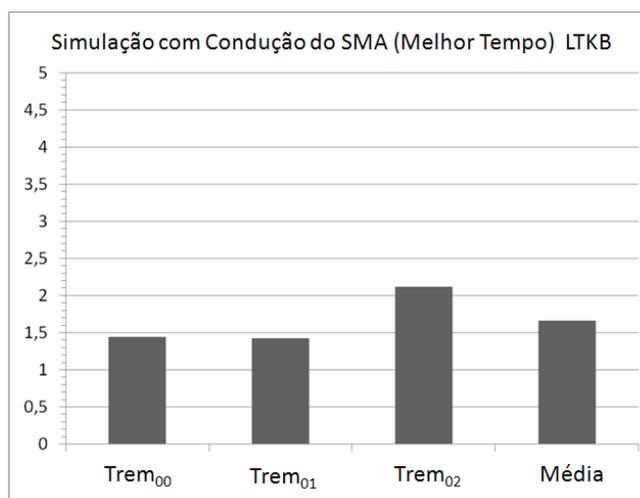


Figura 61 – Simulação do SMA para viagem de 2300s (consumos dos trens LTKB).

Na Figura 61 é verificado o LTKB médio com valor de aproximadamente 1,66 e para uma viagem executada em um tempo aproximado de 2300 segundos. O Trem₀₂ executou a viagem com o maior consumo do trecho, pois, a condução efetuada pelo agente foi mais agressiva na busca da chegada, que deve ser no tempo exato de coordenação para o seu ponto de segurança dentro do desvio.

Os consumos entre o Trem₀₀ e Trem₀₁ são praticamente idênticos. O Trem₀₁ consome um pouco mais de combustível devido a correções na velocidade para manter a distância de segurança e evitar colisões traseiras.

Na Figura 62 são ilustrados todos os tempos totais das simulações pelo sistema e seus consumos médios de LTKB.

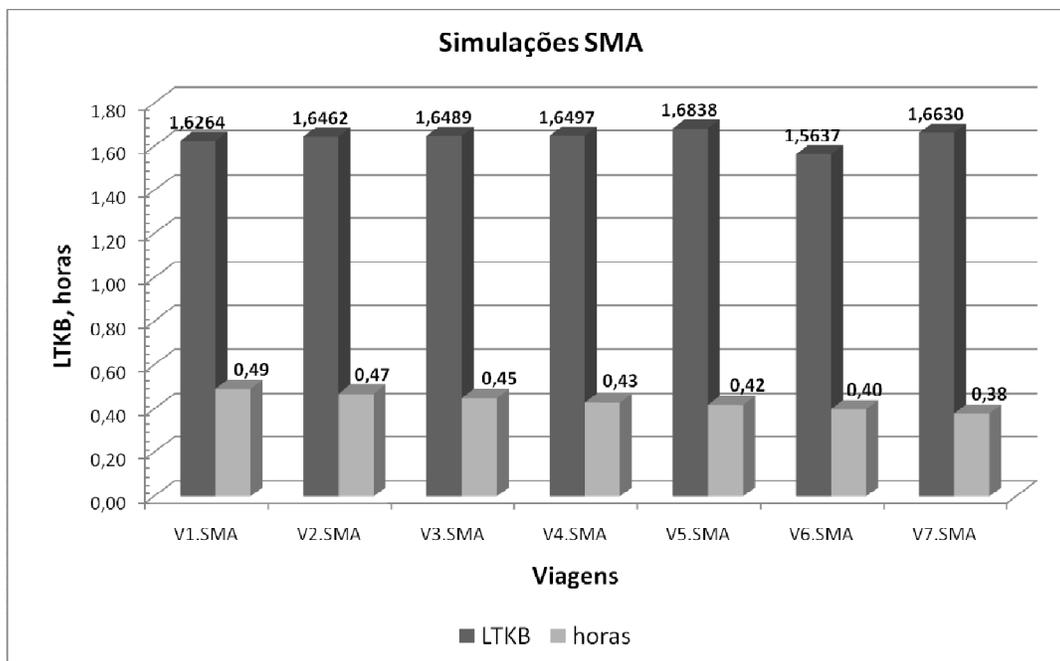


Figura 62 – Consumo médio (LTKB) x tempo total de cada viagem (horas).

A tendência de uma condução com tempo de viagem cada vez menor seria inversamente proporcional ao consumo em LTKB. Porém, não foi constatado esse fato, a medida que nem sempre os agentes obtêm um cálculo preciso para a chegada nos pontos de segurança na área do desvio. Isso pode ocorrer devido a alguma demora na percepção da existência de outros trens no trecho, e pelos atrasos causados nas aplicações e solturas do freio automático dos trens.

Na Figura 62 a viagem *V6.SMA* indica essa ocorrência onde *V6.SMA* teve o tempo total menor que *V1.SMA*, *V2.SMA*, *V3.SMA*, *V4.SMA* e *V5.SMA*, porém, um consumo menor, já em *V7.SMA* o gasto voltou a ser maior.

A partir dos resultados da simulação *V6.SMA* é possível afirmar que a coordenação dos trens no trecho ocorreu de forma precisa nos primeiros cálculos dos tempos de chegada nos pontos de segurança localizados na área do desvio. Quando os tempos de coordenação são calculados de forma imediata os agentes de trem não necessitam utilizar frenagens bruscas e também não executam alterações substanciais de velocidade.

4.8.5. Comparação dos resultados

Nessa seção serão apresentadas algumas comparações entre os consumos dos métodos tradicionais de condução e as conduções realizadas pelo sistema multiagente.

Na Figura 63 é ilustrado o gráfico com as sete viagens executadas pelo sistema mais as três viagens executadas no método tradicional.

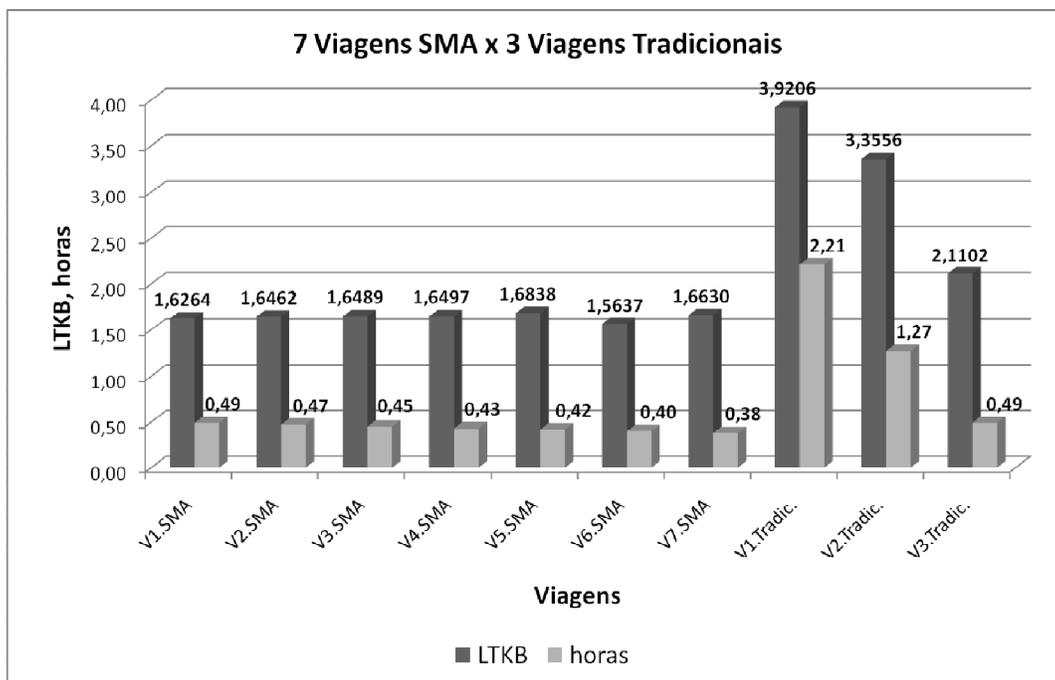


Figura 63 – Comparação entre todas as simulações realizadas.

A partir do gráfico da Figura 63 é possível verificar que o sistema executou todas as sete simulações com tempos que vão de próximo a inferior a melhor viagem executada pela forma tradicional, e também foram sempre obtidos consumos médios menores em LTKB.

A viagem *V6.SMA* executada pelo sistema foi a melhor viagem em consumo. Comparando a viagem *V6.SMA* com a melhor viagem com condução tradicional *V3.Tradic*, foi obtida uma economia de 25,9% e 19% em média de consumo de combustível (LTKB) e tempo respectivamente.

A viagem *V7.SMA* executada pelo sistema foi a melhor viagem em tempo. Comparando a viagem *V7.SMA* com a melhor viagem com condução tradicional *V3.Tradic*,

foi obtida uma economia de 21,2% e 22% em média de consumo de combustível (LTKB) e tempo respectivamente.

4.9. Considerações finais

Com a utilização de um sistema multiagente, capaz de reagir a situações encontradas por maquinistas, foi possível obter trens conduzidos de forma segura e econômica sem necessidade de paradas em desvios.

Os resultados conseguidos reduziram o tempo total da viagem de três trens em um pequeno trecho, tendo ainda uma expressiva economia de combustível, conforme Figura 63. Essa economia pode ser vista ainda como algo benéfico ao meio ambiente, pois evita a emissão de poluentes.

Outro resultado obtido foi à chegada de dois trens que trafegam no mesmo sentido, eles se comportaram como se fossem apenas um trem maior elevando a capacidade do trecho simulado. Esses trens também chegaram ao seu destino final em tempo próximo, algo que não ocorreria na forma de condução tradicional.

O sistema também foi desenvolvido de forma a suportar novos módulos que poderão ser acoplados para diversas outras funções que possam otimizar ainda mais seus resultados.

5. CONCLUSÕES

Com a crescente evolução tecnológica e investimento na área de transporte ferroviário de cargas, o desenvolvimento de sistemas de simulações são cada vez mais requisitados pelas empresas do meio ferroviário. As técnicas de inteligência artificial, em específico os sistemas multiagente, vem de encontro a esses sistemas de simulações para capacitar ainda mais as formas de simulações. Tendo como tomadores de decisões agentes de software que por sua vez realizam ações de forma mais rápidas e seguras em um ambiente totalmente dinâmico.

Este trabalho teve por contribuição criar um sistema capaz de coordenar trens em um trecho de via férrea contendo um desvio, onde foi possível o tráfego de todos os trens envolvidos de forma contínua, ou seja, todos efetuaram suas viagens sem ter que efetuar paradas. As contribuições maiores foram: a criação de regras de condução capazes de movimentar trens de forma econômica prezando em primeiro lugar a segurança; a inserção de mais trens que trafegam no mesmo sentido com um grau de proximidade seguro e com um comportamento único, sendo considerados como apenas um trem; a busca da melhor forma de trafegarem fora e dentro de uma área de desvio; o menor consumo de combustível; e o menor tempo de viagem. Também se pode dizer que evitando altos consumos de combustíveis fósseis, esse trabalho contribui para a redução e emissões de poluentes na atmosfera.

5.1. Resultados

Nas simulações para medir o desempenho dos agentes na condução e coordenação, foram utilizadas simulações de condução que seguiram a forma tradicional de condução, nos quais foram respeitadas todas as formas de sinalizações e seções de bloqueio. Com os resultados obtidos, foi possível executar o sistema na aquisição de resultados com maior qualidade, buscando respostas compatíveis com as dos seres humanos, mas com níveis de percepção e reação mais rápidas.

Os agentes de software condutores dos trens, com o auxílio de outros agentes inseridos no ambiente, obtiveram resultados consistentes de economia de combustível que foi medido pelo LTKB médio dos trens envolvidos nas simulações. A economia de combustível foi entre 21,20 e 25,90%. Também foram obtidos resultados de menor tempo de viagem, no qual foi analisado o tempo total da viagem que seria o tempo de entrada do primeiro trem e de saída do último trem do trecho. Essa redução de tempo foi obtida entre 19,00 e 22,00%.

O sistema pode contribuir ainda com a verificação da extensão do desvio, pois com a verificação do agente que domina o trecho, é possível verificar a proporção da extensão do desvio com a quantidade de trens no trecho. Quanto maior o desvio mais trens podem trafegar no mesmo sentido.

Com o tráfego no mesmo sentido, foi obtida uma distância que proporcionou uma elevação na capacidade da via, pois os agentes que conduziram os trens obtiveram uma distância calculada de segurança em torno de 500 a 700 metros, que possibilitou os trens a finalizarem suas viagens em tempos próximos transpondo a área do desvio como se fosse apenas um trem de maior comprimento. Essa forma de condução foi possível utilizando o método de comunicação entre os agentes que antes de executar certas ações enviavam uma mensagem de antecipação da ação.

Os resultados observados no sistema foram de bom desempenho, o que motiva a continuidade das pesquisas nessa área, onde se possam utilizar cada vez mais novas técnicas de inteligência artificial na busca de resultados cada vez mais expressivos

5.2. Trabalhos futuros

Com base nos resultados deste trabalho, os trabalhos futuros estão direcionados a expandir os recursos desse sistema de tal forma que um agente de licença possa con-

trolar não apenas desvios, mas também outros recursos da via como cruzamentos e pátios.

Nos agentes de trem pode-se elevar sua capacidade de coordenação com a criação de dois módulos, tais como: módulo de planejamento, para substituição do cálculo de chegada nos pontos de segurança e os cálculos de uma viagem completa, de forma a executar uma simulação prévia da viagem até o ponto de segurança e/ou até o ponto final; módulo de re-planejamento, esse módulo poderá recalculer um plano caso haja uma inconsistência do plano atual.

Os agentes de licença também podem ser liberados de arbitrar as mensagens entre os agentes de trem, ficando eles apenas responsáveis pela autenticação das mensagens iniciais entre os agentes de trem. Dessa forma, o agente de licença fica menos sobrecarregado e pode ser mais utilizado em comunicação com outros agentes de licença que estão nas proximidades. Assim, eles poderiam coordenar a entrada dos agentes de trem em seus domínios com uma coordenação prévia, eliminando re-cálculos e mudanças bruscas de velocidade.

Novos recursos como ultrapassagens também serão considerados futuramente, onde trens com maior prioridade façam a ultrapassagem em trens com menor prioridade utilizando os desvios ou os pátios.

Com novos recursos como os indicados, também são esperadas comparações de resultados de tempo de viagens e consumo com relatórios de viagens, que podem ser obtidos com as empresas ferroviárias. Dessa forma será possível estimar diversas formas de melhorar a capacidade da via. Por exemplo, poderá ser estimada a capacidade de obter os pontos onde devam ser construídos novos desvios ou apenas ampliar a extensão dos desvios já existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBINK, E. J.W.; FIOOLE, P-J; MOBACH, D. G. A.; KROON, L. G.; VAN DER HEIJDEN, E.H.T.; WIJNGAARDS, N.J.E. Multi-agent Train Driver Rescheduling: Simulating Environment Dynamics. The 21th Benelux Conference on Artificial Intelligence. 2009.

ARAÚJO, CARLOS H. S. br.monografias.com. Monografias.com SA. [Online] Monografias.com SA, 2 de 4 de 2010. [Acessado em: 12 de 6 de 2010.] <http://br.monografias.com/trabalhos3/setor-ferroviario-brasil/setor-ferroviario-brasil.shtml>. 2010.

BASRA, R.; LU, K.; RZEVSKI, G.; SKOBELEV, P. Resolve Scheduling Issues of the London Underground Using a Multi-Agent System. [ed.] Interscience Publishers. Int. J. Intell. Syst. Tech. Appl., Vol. 2, pp. 3-19, 2005.

BENTLEY, J. P. E.; BENTLEY, J. JR. The Freight Train Emergency Brake System and a Method to Calculate Stop Distance and Time. SAE International. Personal Communication. 2007.

BORGES, A. P. Descoberta de Regras de Condução de Trens de Carga. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 123f, 2009.

BRABAN, C.; YELLOZ, G. Resignalling and Interoperability. IRSE Technical Convention Singapore. 2005.

BRINA, H. L. Estradas de Ferro. Rio de Janeiro. LTC, Vol. 2. 1982.

BROOKS, R. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. Technical Report. 1985.

BROOKS, R.; CONNELL, J. H. Asynchronous Distributed Control System for a Mobile Robot. Proceedings of SPIE's Cambridge Symposium on Optical and Optoelectronic Engineering. pp. 77-84. 1986.

CATERPILLAR. www.brasil.cat.com. Caterpillar. [Online] Caterpillar, 2010. [Acessado em: 15 de 3 de 2010.] <http://brasil.cat.com/cda/components/fullArticleNoNav?ids=367399&languageId=12>. 2010.

CHAPMAN, D. Planning for conjunctive goals. Artificial Intelligence. Elsevier Science Publishers Ltd. Vol. 32, pp. 333-377. 1987.

CNT. Confederação Nacional de Transporte. www.cnt.org.br. [Online] 2010. [Acessado em: 10 de 06 de 2010.] <http://www.cnt.org.br/informacoes/pesquisas/ferroviaria/2006/glossario.htm>. 2010.

CORKILL, D. D. Collaborating Software: Blackboard and Multi-Agent Systems & the Future. Proceedings of the International Lisp Conference, 2003.

DADDARIO, E. Q.; DE SIMONE, D. V. Automatic Train Control in Rail Rapid Transit. Technical Report of Congress of the United States, 1976.

DIVICITY. <http://www.divicity.com>. [Online] Divicity, 26 de 6 de 2010. [Acessado em: 18 de 7 de 2010.] <http://www.divicity.com/portal/index.php/brasil/economiaadesenvolvimento/2677-crescimento-acelerado-expoe-gargalo-na-rede-ferroviaria.html>. 2010.

DROGOUL, A.; FERBER, J. Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies: Application to Social Differentiation in Ant Colonies. In Castelfranchi, C.; Werner, E. (eds.) Artificial Social Systems. Proceedings of the MAAMAW'92. Springer, pp. 3-23. 1994.

ERMAN, L. D.; HAYES-ROTH, F.; LESSER, V. R.; REDDY, D. R. The HEARSAY-II Speech Understanding System: Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty. Blackboard Systems, R. Englemore and T. Morgan, ed., Addison-Wesley, pp. 31-86. 1980.

FERBER, J. Multi-Agent Systems: An Introduction to distributed artificial intelligence. [ed.] Addison-Wesley. 1999.

FIRONI, M. M.; FRANZESE, L. A. G.; HIRAMATSU, N. Y.; MACHADO, M. N. Análise de Investimentos em Infra-Estrutura Ferroviária usando Simulação de Eventos Discretos – Estudo de Caso. XXV Encontro Nac. de Engenharia de Produção. 2005.

GANGULY, S. S. History of Railway Signaling. [Online] 8 de 6 de 2010. [Acessado em: 8 de 6 de 2010.] http://www.irfca.org/~mrinal/hist_rly_signalling.html. 2010.

GIAVINA-BIANCHI, M. www.ttrans.com.br. [Online] TTrans © 2008, Agosto/Setembro de 2009. [Acessado em: 9 de 6 de 2010.] Trans Sistemas de Transportes S.A. http://www.ttrans.com.br/download/Ferrovia_brasileira_a_todo_vapor.pdf. 22. 2009.

HARTONG, M. W. Secure Communications Based Train Control (CBTC) Operations. George Mason University. Fairfax. PhD Thesis, 156f, 2009.

HAYES-ROTH, B. A blackboard architecture for control. Artificial Intelligence. Vol. 26, pp. 251-321. 1985.

HAYES-ROTH, B. Architecture Foundations for Real-Time Performance in Intelligent Agents. Real-Time Syst. V.2, p. 99-125. 1990.

INTELOG. Intelog. Intelog (inteligência em Gestão Logística). [Online] 11 de 11 de 2009. [Acessado em: 8 de 6 de 2010.] http://www.intelog.net/site/default.asp?TroncoID=907492&SecaoID=508074&SubsecaoID=483908&Template=../artigosnoticias/user_exibir.asp&ID=074711&Titulo=Setor%20ferroviario%20prevista%20aportes%20de%20R%24%2074%20bi. 2009.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. 2004. UCI COD 406. 1 st edition, 2004.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A Roadmap of agent Research and Development. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Vol. 1, pp. 7-38. 1998.

LANDEX, A. Evaluation of Railway Networks with single Track Operation Using the UCI 406 Capacity Method. Springer Science + Business Media, LLC 2008.

LANDEX, A. Running Time Calculation. Personal Communication. 2010.

LESSER, V. R.; ERMAN, L. D. A retrospective view of the HEARSAY-II architecture. In Proc. Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 790-800. Boston, 1977.

LESSER, V. Cooperative Multiagent Systems: A Personal View of the State of the Art. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, v.11 n.1, p.133-142, 1999.

LOUMIET, J. R.; JUNGBAUER, W. G. Train Accident Reconstruction and FELA and Railroad Litigation. Fourth Edition. Lawyer & Judges Publishing Company Inc., 2005.

MARTINS, R. S. Simulação da Frenagem de Trem Unitário de Carga. Dissertação de Mestrado. UNICAMP. 1999.

MEDINA, H. Malha ferroviária atinge limite para carga. [Online] Folha de São Paulo, 3 de 16 de 2009. [Acessado em: 22 de 5 de 2010.] <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/dinheiro/fi1603200916.htm>. 2009.

MORIN, EDGAR. *O Método I: a natureza da natureza*. [trad.] M. G. DE BRAGANÇA. 2ª Ed. 1977.

SYCARA, KATIA P. *Multiagent Systems*. California : Intelligence, American Association for Artificial, AI Magazine, Vol. 12. www.aaai.org. 2. 1988.

NEW YORK CITY SUBWAYS. New York City Subways. [Online] [Acessado em: 10 de 6 de 2010]. http://www.nycsubway.org/articles/signals_interlocking.html. 2010.

NGUYEN-DUC, M.; GUESSOUM, Z.; MARIN, O.; PERROT, J. F.; BRIOT, J. P. A multi-Agent Approach to Reliable Air Traffic control. 2nd International Symposium on Agent Based Modeling and Simulation. 2008.

OCCELLO, M.; DEMAZEAU, Y. Building Real Time agents using Parallel Blackboards and its use for Mobile Robotics. IEEE international Conference on Systems, Man and Cybernetics. October de 1994.

PACIFIC SOUTHWEST RAILWAY MUSEUM. Pacific Southwest Railway Museum. www.sdrm.org. [Online] 10 de 6 de 2010. [Acessado em: 10 de 6 de 2010.] <http://www.sdrm.org/faqs/rulebook/acs1a.html>. 2010.

PEREIRA, O. C. Soluções de Otimização da Eficiência Energética de uma Ferrovia de Carga. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 126f. 2009.

PINTO, P. D. Estudo da Eficiência de um Motor Diesel Utilizando Bicombustível. Revista Ferroviária. VII Prêmio Amsted Maxion de Tecnologia Ferroviária. 2009.

PORTO, T. G. www.poli.usp.br/d/ptr2501. www.poli.usp.br. [Online] 2005. [Acessado em: 10 de 06 de 2010.] www.poli.usp.br/d/ptr2501. 2005.

PROENÇA, H. M. C. MARCS-Sistema Multi-Agente para Controle de Tráfego Ferroviário. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. 231f., 2003.

RPC RAIL CONSULTING. Railway Technical Web Pages. [Online] 10 de 5 de 2010. [Acessado em: 10 de 5 de 2010.] <http://www.railway-technical.com>. 2010.

SEARLE, J. R. Minds, Brains and Programs. [ed.] Bloom, P.; Finlay, B.L. The Behavioral and Brain Sciences. Vol. 33, pp. 140-152. 1980.

SHEN, W.; NORRIE, D. H.; BARTHÉS, J. P. A Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing. Taylor & Francis. 2001.

THE TUBE. Official Website for the London Underground Infrastructure. [Online] 7 de 6 de 2010. [Acessado em: 7 de 6 de 2010.] www.TheTube.com. 2010.

TODESCHINI, M. epocanegocios.globo.com/Revista. [Online] Revista Época Negócios, 5 de 5 de 2009. [Acessado em: 16 de 7 de 2010.] <http://epocanegocios.globo.com/Revista/Common/0,,EMI71448-16642-3,00-NOS+TRILHOS+DA+ALL.html>. 2009.

TÖRNQUIST; J.; DAVIDSSON, P. A Multi-Agent System Approach to Train Delay Handling. ECAI-02 Workshop on Agent Technologies in Logistics. 2002.

TRAINS MAGAZINE. Trains Magazine. www.trains.com. [Online] 10 de 6 de 2010. [Acessado em: 10 de 6 de 2010.] <http://www.trains.com/trn/default.aspx?c=a&id=191>. 2010.

WEISS, G. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, MIT Press, 1999.

WOOLDRIDGE, M., JENNINGS, N. R. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, Vol. 10, pp. 115-152. 1995.

WOOLDRIDGE, M. An introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons. 2002.