

**São Paulo
2001**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia.**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR FUZZY
PARA CONDUÇÃO DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA**

MARIA A. PADILHA GANDARA MENDES

São Paulo
2001

Orientador:
Agenor Toledo Fleury

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR FUZZY
PARA CONDUÇÃO DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA**

MARIA A. PADILHA GANDARA MENDES

Aos meus filhos João e Pedro Gabriel,
que são a maior razão de minha
existência.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Agenor T. Fleury pela orientação e dedicação durante todo o desenvolvimento desta tese.
- Ao meu marido Fernando, de maneira especial, pela paciência, incentivo e principalmente pelas idéias e esclarecimentos técnicos fornecidos.
- Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., pelos recursos fornecidos através da Divisão de Tecnologia de Transportes.
- A todos os amigos do IPT, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	
"ABSTRACT"	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	1
1.2 HISTÓRICO / ESTADO DA ARTE	8
2. INTRODUÇÃO À DINÂMICA LONGITUDINAL DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA	14
2.1 SISTEMA DE ACOPLAMENTO	17
2.1.1 Engate	17
2.1.2 Aparelho de choque e tração	19
2.2 SISTEMA DE FREIOS PNEUMÁTICOS	23
2.3 SISTEMA DE TRACÇÃO	26
2.4 VIA FÉRREA	30
3. OBTENÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA DINÂMICA LONGITUDINAL	32
3.1 INTRODUÇÃO	32
3.2 DELINEAMENTO DO MODELO MATEMÁTICO	33
3.2.1 Descrição das forças do aparelho de choque e tração	35
3.2.2 Descrição das forças externas	36
3.3 EQUACIONAMENTO DO APARELHO DE CHOQUE E TRACÇÃO	38
3.4 EQUACIONAMENTO DAS FORÇAS DE RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	42
3.4.1 Resistência devido à inclinação da via	42
3.4.2 Resistência à partida da composição	43
3.4.3 Resistência devida ao rolamento	44
3.4.4 Resistência à curvatura da via	44
3.5 EQUACIONAMENTO DAS FORÇAS DE FREAGEM	45
4. CONCEITOS DE LÓGICA FUZZY	50
4.1 INTRODUÇÃO	51
4.2 TEORIA DE CONJUNTOS CLÁSSICA	51
4.2.1 Operações nos conjuntos	51
4.2.2 Relações e funções	52
4.2.3 Conjuntos indicadores de função	52

53	4.3 TEORIA DE CONJUNTOS FUZZY
54	4.3.1 Definição de conjuntos fuzzy
55	4.3.2 Propriedades
58	4.3.3 Número fuzzy
58	4.3.4 Princípio da extensão
59	4.3.5 Operações em conjuntos fuzzy
61	4.3.6 Relação fuzzy e suas composições
62	4.3.7 Variáveis linguísticas
63	4.4 LÓGICA E RACIOCÍNIO FUZZY
64	4.4.1 Proposições fuzzy
65	4.4.2 Regras fuzzy
66	4.4.3 Implicações fuzzy
67	4.4.4 Modus ponens generalizado e modus tollens generalizado
68	5. SISTEMAS BASEADOS EM LÓGICA FUZZY
68	5.1 SISTEMAS FUZZY Puros
69	5.1.1 Base de conhecimento ou base de regras fuzzy
73	5.2 SISTEMAS FUZZY DE TAKAGI E SUGENO
75	5.3 SISTEMAS FUZZY COM FUZZIFICADOR E DEFUZZIFICADOR
76	5.3.1 Interface de fuzzyficação
78	5.3.2 Interface de defuzzyficação
80	5.4 SISTEMA FUZZY COM CONTROLADOR
81	5.4.1 Escolha das variáveis de estado e variáveis de saída do processo
82	5.4.2 Obtenção das regras de controle
88	6. DESCRIÇÃO DO CONTROLADOR / CONSELHEIRO FUZZY
91	6.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA DO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY
93	6.2 VARIÁVEL DE SAÍDA DO CONTROLADOR LÓGICO FUZZY
94	6.3 FUZZIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA
94	6.3.1 Fuzzyficação da aceleração longitudinal da locomotiva
96	6.3.2 Fuzzyficação da velocidade da composição
97	6.3.3 Fuzzyficação do perfil vertical compensado da via
99	6.3.4 Fuzzyficação da variável intervalo de tempo de intervenção no ponto de operação
101	6.3.5 Intervalo de tempo para redução da velocidade
102	6.4 BASE DE CONHECIMENTO E REGRAS DE INFÉRENCIA
103	6.4.1 Procedimento de partida
106	6.4.2 Procedimento de viagem a velocidade constante
112	6.4.3 Procedimento de parada
114	7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

119	7.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS PARA A VIA PADRÃO	119
120	7.1.1 Análise do comportamento dinâmico global da composição	120
120	7.1.1.1 Análise do procedimento de partida	120
121	7.1.1.2 Análise do procedimento de viagem em regime	121
122	7.1.1.3 Análise do procedimento de parada	122
123	7.1.2 Análise do comportamento do controlador fuzzy quanto à variação do carregamento dos vagões do trem	123
124	7.1.2.1 Análise do procedimento de partida	124
126	7.1.2.2 Análise do procedimento de viagem em regime	126
128	7.1.2.3 Análise do procedimento de parada	128
130	7.1.3 Análise do comportamento do controlador fuzzy quanto à variação do comprimento do trem	130
131	7.1.3.1 Análise do procedimento de partida	131
132	7.1.3.2 Análise do procedimento de viagem em regime	132
135	7.1.3.3 Análise do procedimento de parada	135
138	7.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS PARA UM TRECHO DE VIA REAL	138
138	7.2.1 Análise do comportamento dinâmico global da composição	138
139	7.2.1.1 Análise do procedimento de partida	139
139	7.2.1.2 Análise do procedimento de viagem em regime	139
141	7.2.1.3 Análise do procedimento de parada	141
141	7.2.2 Análise do comportamento do controlador fuzzy quanto à variação do carregamento dos vagões do trem	141
142	7.2.2.1 Análise do procedimento de partida	142
144	7.2.2.2 Análise do procedimento de viagem em regime	144
147	7.2.2.3 Análise do procedimento de parada	147
149	8. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	149
156	ANEXO A	156
181	ANEXO B	181
183	ANEXO C	183
186	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186

RESUMO

A operação de trens exige, para seu sucesso, o tratamento de um vasto conjunto de comandos complexos, de difícil assimilação por pessoal sem a devida experiência. Para auxiliar operações ferroviárias, tanto em configurações embarcadas como no treinamento de novos operadores, este trabalho trata do desenvolvimento de um controlador, baseado em Lógica Fuzzy (ou Lógica Difusa). Foi construído um algoritmo de controle no qual a habilidade de um operador experiente é inserida através de conjuntos e regras de inferência, que trabalha apoiado em programa de simulação dinâmica de operações ferroviárias. A sensibilidade do operador é introduzida no modelo através de índices de desempenho, avaliados a cada passo do controle, que devem ser satisfatórios como um conjunto de funções. Os índices de Desempenho considerados são: garantia de segurança na viagem, minimização dos esforços longitudinais nos engates, otimização da traçabilidade da velocidade ideal, otimização do tempo de percurso e redução de consumo de combustível. As ações de controle são selecionadas a partir de um conjunto de regras, descritas em Lógica Fuzzy, que consideram os resultados dos vários índices. Foram desenvolvidas simulações levando em conta três principais tipos de operação para a dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária: partida do estado de repouso, viagem em regime e parada. Os resultados obtidos, considerados muito bons, são apresentados e discutidos ao longo do texto.

ABSTRACT

Railway operation requires, in order to be accomplished successfully, treatment of a large set of complex rules, a task generally far from the non skilled personnel. As an aid to the railway operation, both on board or as a training simulator, this work discusses the development of a Fuzzy Logic based train controller. A control algorithm supported by a dynamic railway operation simulation program has been built including the ability of skilled train operators through a set of inference rules. Operator sensitivities have been added to the model through Performance Indexes evaluated at each control step. The indexes considered here are: safety assurance during trip, minimization of the longitudinal coupler forces, optimization of the ideal velocity traceability, trip time optimization and fuel consumption optimization. Control actions are selected from a set of fuzzy logic rules that take the index results into account. Simulations have been implemented considering three of the main train operation types for longitudinal railway dynamics: departure from the rest, steady state and stoppage. Simulation results that can be considered very good for this approach are presented and discussed along the text.

descarrilhamento.

encurtando, portanto, sua vida útil, assim como pode levar a composição ao compressão, as quais são responsáveis por causar fadiga em componentes, mal conduzida, tais esforços podem resultar em grandes forças de tração e/ou estabilidade, segurança e eficiência da operação do trem. Em uma operação entre os veículos de uma composição têm um papel muito importante na os veículos e a via. Os esforços dinâmicos gerados no sentido longitudinal individuais de cada veículo, em interações dinâmicas entre os veículos e entre restrições locais da via. Esse conjunto de ações implica em movimentos de freios, paradas, que são realizados em diferentes perfis de terreno e vários procedimentos de operação como aceleração, desaceleração, aplicação Uma viagem típica de um trem, desde o ponto inicial até o ponto final, envolve

maquinistas até aumento na configuração do trem.

procedimentos operacionais, que envolve desde um melhor treinamento para de via permanente e material rodante e, principalmente, com a otimização de produtividade, através de melhores técnicas de comercialização, manutenção observa-se que as empresas operadoras têm buscado aumentar a Atualmente no Brasil, com a privatização de quase toda a malha ferroviária,

1.1 Objetivo

1. INTRODUÇÃO

A operação ferroviária no Brasil pode ser realizada basicamente de três formas: totalmente automática, parcialmente automática, a qual requer algum tipo de intervenção manual e a totalmente manual. A operação totalmente automática é realizada por um sistema de controle automático, conhecido como ATC ("Automatic Train Control"), o qual é composto por três subsistemas: ATP ("Automatic Train Protection"), ATS ("Automatic Train Supervision") e ATO ("Automatic Train Operation"). O ATP é uma unidade de controle em cada bloco de via, cuja função é manter cada trem a uma distância segura dos demais trens da via. Esta unidade recebe dados dos blocos de via a frente, converte-os em dados de limite de velocidade para o bloco que ela controla e retornando-os para a via. Estes dados, que são limitantes superiores de velocidade, são capturados pelo trem através de códigos transmitidos ao longo da via, podendo ainda serem enviados para o computador do ATS, para comparar se o trem está no horário previsto. Para ajustar o horário do trem o ATS pode acionar o ATO, que pode enviar comandos para o trem através do sistema de sinalização localizado ao longo da via.

As operações parcialmente controladas são realizadas por máquinas auxiliares por algum ou alguns dos subsistemas acima descritos. Com exceção da operação totalmente automática, tipo ATC, onde o maquinista tem muito pouco ou quase nenhuma autonomia para a condução do trem, nos demais casos, a operação pode depender parcialmente ou totalmente da atitude do maquinista, de seus critérios de avaliação e capacidade de decisão.

O que se propõe neste trabalho é o desenvolvimento de um sistema especialista, baseado em algoritmos de lógica fuzzy¹, que, na prática, vai funcionar como um *sistema conselheiro* de operação ferroviária. Este sistema conselheiro busca acumular a experiência de todo o corpo de maquinistas envolvidos com um determinado tipo de operação, assim como levar em conta as técnicas de engenharia para apoiar e fornecer subsídios ao maquinista que está isolado na locomotiva durante a viagem. A princípio, o controlador fuzzy foi projetado para trabalhar em paralelo com o maquinista, fornecendo-lhe subsídios nas operações mais críticas. Em uma fase inicial, considerada ainda como de aprendizagem para o controlador, é interessante ter o registro da operação realizada pelo maquinista e daquela sugerida pelo controlador fuzzy durante toda a viagem, para avaliação e incorporação de novos conhecimentos, nas situações em que as atitudes dos maquinistas forem melhores que as sugeridas pelo controlador. Após algum tempo de operação conjunta, quando o controlador ou conselheiro fuzzy já tiver sido otimizado para um determinado tipo de operação, ele pode também ser utilizado em conjunto com os simuladores de operação para treinamento de maquinistas menos experientes.

A ideia da aplicação de lógica fuzzy em operação ferroviária surgiu devido à grande demanda em todo o mundo, pela utilização dessa teoria como uma poderosa ferramenta para tomada de decisão, cujas aplicações vão desde complexos sistemas de controle industrial a controle de equipamentos domésticos. Existe, atualmente, por parte da indústria, um grande interesse em

¹ O termo "fuzzy" é utilizado em todo o texto com o significado de difuso ou nebuloso. São ainda

Os controladores fuzzy são, em geral, representados por base de regras condicionais tipo "if-else", que fornecem uma forma de representação do conhecimento de fácil entendimento e manuseio. Em um processo de controle fuzzy deve ter sempre como base a mente humana.

inconsciente, tais regras. Assim, o modelo utilizado para a derivação de regras fuzzy e essencialmente o raciocínio humano manipulada, de forma consciente ou nossas experiências está armazenada em nossa memória em forma de regras característica é que ela é muito próxima da intuição humana. A maioria de teoria de controle tradicional, porém sua principal e mais importante análise de sistemas em geral. A metodologia proposta difere da utilizada em metodologia bastante eficiente para lidar com as dependências imprecisas em O procedimento adotado para o cálculo de regras fuzzy fornece uma

particular, o cálculo de regras fuzzy, tipo "if-else".
desenvolvimento dos controladores fuzzy é a teoria de relações fuzzy, e em para a teoria de controle fuzzy, pois o tópico mais importante para o É importante observar que a teoria de lógica fuzzy é utilizada como uma base como sendo "high-tech".

sistemas de controle desenvolvidos com tecnologia fuzzy, sendo que no Japão há até mesmo uma orientação nesse sentido pois foi comprovado que produtos com tecnologia fuzzy são facilmente comercializados e portanto mais competitivos, já que essa nova tecnologia é rotulada no mercado consumidor

fuzzy, as variáveis quantitativas, registradas pelos sensores do sistema a ser controlado, são transformadas em variáveis qualitativas através do processo de *fuzzificação*². Essas variáveis são avaliadas através de declarações qualitativas, representadas por regras tipo "if-else", implicando em uma informação final ainda qualitativa, que após o processo de *defuzzificação*³, passa a ser novamente uma variável quantitativa, que pode, então, ser utilizada pelo atuador do processo de controle.

No processo acima descrito pode haver perda de informação, pois não existe uma transformação unívoca de uma variável qualitativa em quantitativa e vice-versa, com exceção de alguns casos especiais. Por exemplo, não existe uma transformação única que associa à expressão "grande esforço de tração" um valor real de esforço de tração. Como em teoria de controle tradicional, espera-se que a saída do controlador seja expressa em termos de quantidades precisas, visto que esse valor vai ser utilizado como atuador de um motor, de uma válvula, de uma manete de operação, etc., algumas técnicas especiais são desenvolvidas para transformar uma informação qualitativa em uma informação quantitativa de forma eficiente.

A principal vantagem de um controlador fuzzy é o fato de que complexas estratégias de controle, que são de conhecimento somente de experientes operadores ou engenheiros de processos, na forma de experiência ou mesmo domínio de conhecimento, podem ser "programadas" e transformadas em algoritmos de controle fuzzy. Por algoritmo fuzzy entende-se um conjunto

² Fuzzificação é o processo de transformar uma variável real discreta em uma variável fuzzy.

ordenado de instruções, cuja execução implica na solução de um problema específico.

O objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um conjunto de regras de controle fuzzy, para que a operação de uma composição ferroviária possa ser realizada de forma eficiente e segura. A obtenção das regras fuzzy foi realizada através da observação de como maquinistas experientes realizam uma operação típica nas mais diversas condições. Juntamente com essas regras foram incorporadas regras básicas de segurança em operação ferroviária. Assim, o controlador de operações ferroviárias foi idealizado como sendo um sistema capaz de operar uma composição de forma mais inteligente, considerando que o procedimento operacional é avaliado a todo instante, através das respostas obtidas pelos sensores que revelam o estado atual da dinâmica longitudinal do trem em função da ação de controle adotada no instante anterior, levando em conta os esforços externos a que a composição está sujeita no instante atual e os que estará em um instante futuro. Usando a base de conhecimento adquirida de maquinistas experientes, define-se uma nova ação de controle para o novo intervalo. No processo de definição da ação de controle a ser tomada, alguns parâmetros são otimizados, dependendo do tipo de procedimento de operação que está sendo adotado. Pode-se otimizar a tratabilidade da velocidade, que implica na redução da variação do perfil da velocidade, otimizar tempo de percurso, minimizar o consumo de combustível, otimizar a vida útil de componentes, reduzir custo de manutenção, etc.

O presente trabalho foi desenvolvido em oito capítulos. No Capítulo 1 é feita uma introdução do trabalho e apresentada uma pesquisa sobre o estado da arte de sistemas especialistas fuzzy. O Capítulo 2 descreve uma composição ferroviário, do ponto de vista do comportamento da dinâmica longitudinal, e os elementos que a compõem. No Capítulo 3 é descrito detalhadamente o modelo matemático do simulador de operação ferroviário, utilizado para testar o controlador fuzzy. No Capítulo 4 são desenvolvidos os principais conceitos de Lógica Fuzzy, enquanto que no Capítulo 5 são descritos os principais tipos de sistemas especialistas baseados em Lógica Fuzzy. No Capítulo 6 é feita a descrição do Controlador Fuzzy para operar uma composição ferroviária. No Capítulo 7 são apresentados os principais resultados obtidos e no Capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho.

1.2 Histórico / Estado da Arte

A lógica fuzzy tem emergido nos últimos tempos como uma poderosa ferramenta para o desenvolvimento de sistemas especialistas de tomada de decisão. As aplicações englobam uma grande variedade de sistemas como: controle automático de processos industriais, controle automático de trens de metrô, controle de equipamentos domésticos, sistemas de diagnósticos médicos, etc.

Durante todo o desenvolvimento da teoria de lógica fuzzy, existem basicamente dois marcos significantes. O primeiro ocorreu em 1965 quando a lógica fuzzy foi apresentada formalmente ao meio acadêmico, por ZADEH, um professor de ciência da computação da Universidade da Califórnia. A teoria desenvolvida foi formulada para tratar de problemas com imprecisão, nos quais algumas classes de objetos não admitem um tratamento convencional, ou seja, é uma ferramenta para tratar de variáveis que são definidas de forma vaga ou com pouca precisão. O outro marco aconteceu em 1974, quando MANDANI apresentou os primeiros resultados de um controlador de processos baseado em lógica fuzzy.

É importante lembrar que a teoria de lógica fuzzy não surgiu do nada, pois Aristóteles já havia realizado alguns trabalhos em lógica e já em "Prior Analytics" apresentou um estudo que influenciou por muitos anos o desenvolvimento da lógica, cuja ideia central é a seguinte: "o presente é preciso e apenas o futuro contém *imprecisões*". Segundo KORNBER (1967) há

aproximadamente 200 anos antes de Aristóteles, Heráclito e Anaximandro, desenvolveram vários conceitos para sistemas lógicos de múltiplos estados, sendo que somente em 1930, Jan Lukaszewics, em LEJEWSKI (1967), formulou a teoria de lógica multivalível utilizando esses mesmos conceitos.

Durante as últimas décadas, a lógica fuzzy tem encontrado numerosas aplicações que vão desde um sistema para predição de terremotos, até sistemas de engenharia financeira. Entretanto, foi a aplicação da teoria de lógica fuzzy em sistemas de controle que surpreendeu pelos resultados e tornou-se uma ferramenta bastante rendosa.

É bastante comum encontrar na literatura a afirmação de que um controlador fuzzy fornece maior robustez que um controlador convencional tipo PID, JANTZEN (1998), porém até o presente momento nenhuma pesquisa foi localizada, provando tal fato. JAGER (1995) mostra que um controlador fuzzy é, na realidade, uma não-linearidade estática, cuja robustez depende basicamente das regras que a definem. Entretanto, quando a forma de variação dos parâmetros do processo for bem conhecida, um controlador fuzzy pode ser menos sensível à variação desses parâmetros e, portanto, mais robusto, que um controlador linear. Então, em algumas condições, é possível afirmar que os controladores fuzzy podem ser mais robustos a variações de parâmetros conhecidos.

Há, também, a afirmação que controladores fuzzy são mais apropriados para controlar sistemas não-lineares, porém a capacidade de controlar qualquer

sistema depende basicamente dos parâmetros de entrada do controlador. Assim, este fato é verdade somente para os casos de controladores fuzzy para os quais as não-linearidades das entradas do processo de controle possam ser escritas em função do erro e suas derivadas; ou seja, é necessário o conhecimento adicional das não linearidades do processo a ser controlado.

Concluindo, é possível afirmar que os controladores fuzzy fornecem um método de construir algoritmos de uma forma natural e fornecem ainda a capacidade de capturar a forma de controle não-linear do comportamento humano, a qual tem mostrado ser bastante eficiente para a realização de tarefas mais complexas.

A forma de projetar esse tipo de controle é bastante próxima da forma de pensar e perceber humana, o que de certa forma reduz o tempo necessário para o desenvolvimento. A robustez do controle humano, está na habilidade de adaptação a mudanças do meio e principalmente à capacidade de aprendizado. A incorporação dessas habilidades humanas a um controlador fuzzy deve ser vista como a principal razão de seu sucesso.

Considerando o atual estágio de desenvolvimento de controladores fuzzy, é possível afirmar que as principais áreas onde tais controladores podem ser aplicados com sucesso são:

a) Processos que podem ser perfeitamente controlados ou operados por pessoas e processos nos quais o controlador projetado utiliza-se de sensores que fornecem informações similares àquelas utilizadas pelas pessoas para

tomada de decisão. Os principais exemplos desse tipo de aplicação são as transmissões automáticas de carro, máquinas de lavar, frenagem automática de caminhões, etc.

b) Processos que podem ser perfeitamente controlados por algoritmos de controle linear e que necessitam de um aprimoramento em seus projetos para resultar em algoritmos de controle não linear, os quais são conhecidos pelos operadores ou pelos engenheiros de processo.

As aplicações mais notáveis de sistemas especialistas com tecnologia fuzzy encontradas atualmente na literatura são:

- Controle de um sistema para aquecer água desenvolvido por KICKERT, LEMKE (1976),
- Controle de robô, desenvolvido primeiramente por URAGAMI et al. (1976). Outros sistemas de controle de robôs continuam sendo desenvolvidos, existindo uma grande quantidade de artigos publicados sobre o assunto,
- Controle de um trocador de calor e de um forno de cimento desenvolvido por OSTERGAAD (1977),
- Sistema de controle de tráfego por PAPPIS, MANDANI (1977),
- Sistema de controle de voo por LARKIN (1985),
- Controle automático para manobrar e estacionar carros por SUGENO, MURAKAMI (1984),
- Controle de processo para purificação de águas residuais, desenvolvido por YAGISHITA, ITOH, SUGENO (1985),

- Sistema de controle para elevadores desenvolvido pela Fujitec Co., Ltd em Osaka, Japão em 1988,
- Sistema de transmissão automática para carro, desenvolvido por KASAI, MORIMOTO (1988),
- TOGAI e WATANABE (1986) desenvolveram o primeiro dispositivo com memória baseado em lógica fuzzy. A seguir muitos outros dispositivos com funções de microcontroladores foram e continuam sendo desenvolvidos, existindo, inclusive, uma norma internacional da International Electrotechnical Commission (IEC 1131-3), que fornece um procedimento básico para o desenvolvimento de um sistema especialista baseado em lógica fuzzy. Em 1992, equipes da Intel Corp., e da Inform Software Corp., desenvolveram o primeiro microcontrolador baseado em teoria de controle fuzzy. Atualmente, muitas empresas, como a Fujitsu, Siemens, SGS-Thomson e VLSI, estão fabricando esses tipos de microcontroladores.
- YASUNOBU, MIYAMOTO (1986) propuseram um sistema para realizar operação automática de trem de passageiros, utilizando controle fuzzy preditivo. Em 1987, a Hitachi desenvolveu e implantou um sistema para realizar operação automática de um trem de passageiros, que tem sido usado em um sistema de metrô na cidade de Sendai, Japão. Este controlador preditivo fuzzy pode realizar dois tipos de operações: operação com controle automático de velocidade constante e operação de controle automático de parada. Em ambos os casos, as regras de operação fuzzy foram baseadas em conhecimentos de experientes maquinistas, levando em conta critérios de segurança, conforto, tragaabilidade da velocidade, consumo de energia, tempo de chegada e precisão de parada. Este sistema

de controle automático fuzzy de metrô tem se mostrado ser mais eficiente

que o sistema utilizado anteriormente, que era o tradicional sistema PID.

Recentemente tem crescido bastante o número de aplicações de sistema

baseados em lógica fuzzy, em áreas distintas de controle de processo. Por

exemplo:

- Diagnóstico médico, apresentado por LESMO et al. (1982).

- Recuperação de informações por NAKAMURA, Iwai (1982).

- modelagem matemática de sistemas por TAKAGI, SUGENO (1985).

- classificação de padrões por ISHIBUCHI et al. (1993).

Têm surgido, ainda, sistemas especialistas, conforme relatado por SCHWARZ (1992), utilizando combinação de redes neurais e lógica fuzzy para reconhecimento de voz, imagem e caracteres. Na área médica, as principais aplicações são: diagnóstico de câncer desenvolvido pela Kawasaki Medical School e classificação de imagem radiográfica.

2. INTRODUÇÃO À DINÂMICA LONGITUDINAL DE UMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA

O movimento de um trem ao longo de uma viagem típica, envolve vários procedimentos de operação, como acelerações, desacelerações e frenagens dependendo da condição de operação e do perfil topográfico da via. Esse conjunto de procedimentos operacionais produz interações entre os veículos da composição e seus componentes, assim como entre os veículos e a via. Os esforços gerados devido às interações dinâmicas são o ponto crucial para garantir estabilidade e segurança à operação do trem.

Neste capítulo serão fornecidos os conceitos básicos que envolvem uma composição ferroviária, do ponto de vista dos veículos (vagões e locomotivas e seus componentes) e da via férrea.

Uma composição ferroviária pode ser descrita como um conjunto de veículos, que, neste caso, compreendem os *vagões de carga* e as *locomotivas*, que também são as unidades propulsivas, os quais estão conectados uns aos outros através de *engates e aparelhos de choque e tração*. O conjunto formado pelos engates e aparelhos de choque e tração desempenham a função de um sistema mola-amortecedor não-linear na direção longitudinal. Cada vagão possui um sistema que realiza a frenagem individualmente, porém o processo de frenagem é acionado através da locomotiva, assim como todos os

procedimentos para aceleração ou desaceleração. Durante o processo de *frenagem pneumática* toda a energia cinética da composição é dissipada em forma de calor pelas rodas e trilhos. Na *frenagem dinâmica*, os motores de tração da locomotiva, que normalmente fornecem a energia propulsiva, são usados como geradores elétricos para dissipar a energia cinética do trem como calor através dos resistores.

Os veículos da composição durante uma viagem típica, onde há acalives, declives, tangentes e curvas podem estar configurados entre si, em três estados: em equilíbrio com esforços externos nulos, comprimidos ou estendidos. Quando os veículos encontram-se no modo comprimido, eles estão sujeitos à *força de compressão*, enquanto que no modo estendido estão sujeitos à força de tração. Dependendo do perfil do terreno, da distribuição de massas do trem e do procedimento de operação adotado, é possível ocorrer ao mesmo tempo, em algumas partes, forças de tração e, em outras forças de compressão. Um exemplo é um trem longo em um acalive. A parte do trem que já venceu o acalive e começou a descer tende a ser puxada para frente e a se comprimir na direção da locomotiva, enquanto que a parte final do trem que ainda não venceu o acalive continua sendo tracionada. Este tipo de situação provoca severas oscilações longitudinais, as quais podem ser parcialmente controladas pelo maquinista, através da utilização de ponto de tração e aplicação de freios.

Os principais problemas decorrentes de grandes forças de tração ou compressão na direção longitudinal da composição são:

A configuração do trem e a forma de operação podem ser avaliados através de simuladores de operação, que são programas de computador que podem tanto ser utilizados para montar a melhor configuração física de uma composição para uma viagem típica, como para treinar maquinistas menos experientes.

- comandos de controle de operação acionados pelo maquinista.
- a configuração do trem,

rodante. Dois outros, porém, são passíveis de alteração:
Dos itens relacionados acima, é possível identificar alguns que não podem ser facilmente alterados, como é o caso de características da via e do material

- aplicação de freios.
- perfil de velocidade e forma de manipulação do ponto de tração e de tipos de aparelho de choque e tração utilizado,
- características do sistema de freios empregado,
- perfil vertical (acilves e declives) e curvatura da via, tração,
- locomotivas e vagões, seus pesos, posições relativas e potência de configuração da composição, que compreende o número de longitudinalais, em um sentido mais geral, são:
- Os principais fatores que contribuem para a ocorrência de grandes forças

- fadiga de componentes.
- efeito canivete causado por excessivas forças de compressão,
- quebra de engates devido a excessivas forças de tração,

Concluindo, no estudo proposto a composição ferroviária será estudada como sendo um sistema dinâmico multi-corpos, onde os veículos representam as massas, e os engates e os aparelhos de choque e tração representam os elementos de molas e amortecedores respectivamente, com interações entre a roda e a via, e cujo comportamento dinâmico é função do perfil da via, do tipo de operação e dos elementos que o compõe.

A seguir é realizada uma descrição mais detalhada dos principais elementos que compõem a composição ferroviária e a via férrea.

2.1 Sistema de Acoplamento

O sistema de acoplamento entre dois vagões consecutivos é formado pelo engate e pelo aparelho de choque e tração.

2.1.1 Engate

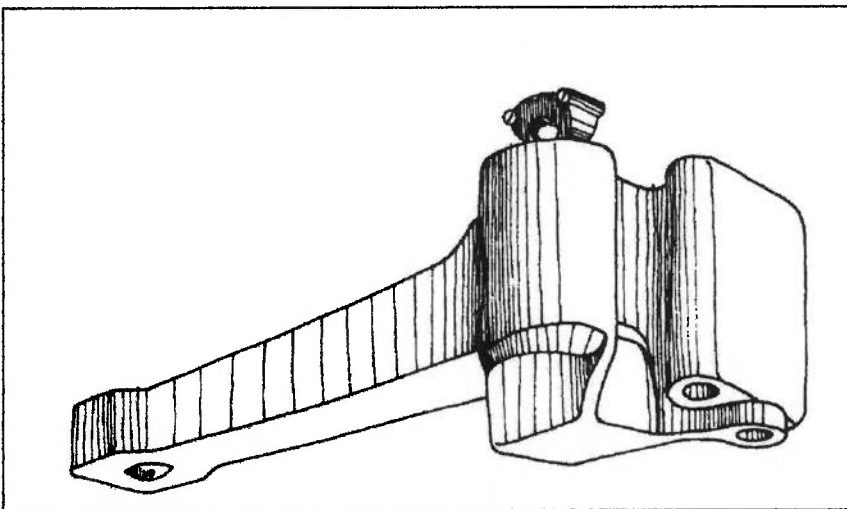
O engate é o elemento que interliga no sentido longitudinal dois veículos. Existem vários tipos de engates, que são classificados como E, F e H. Para ilustrar um tipo de engate bastante usual, é reproduzido na Figura 2.1 um engate extraído de DUKKIPATI e AMYOT(1988).

A conexão realizada pelo engate entre dois veículos consecutivos não é totalmente sólida, pois sua função é agir como se fosse uma mola, com uma rigidez alta, e com uma zona morta, cuja largura é definida pela *folga do engate*. A finalidade da folga é permitir que alguns procedimentos de partida e parada sejam realizados com maior facilidade. Por exemplo, para que uma locomotiva realize a partida do estado de repouso com maior facilidade, antes de começar o processo de partida da composição, um maquinista bem treinado, deve dar ré, retornando, assim, a composição de forma a ajustar todos os veículos e eliminar as folgas. Quando a locomotiva começar a se movimentar para a frente, ela vai começar a puxar um vagão de cada vez de forma sequencial, reduzindo o esforço de tração em cada engate.

Por outro lado, a folga também é responsável pelas variações que ocorrem no comprimento do trem durante um processo de frenagem, aceleração ou

AMYOT(1988)).

Figura 2.1 – Representação Esquemática de um Engate (DUKKIPATI e



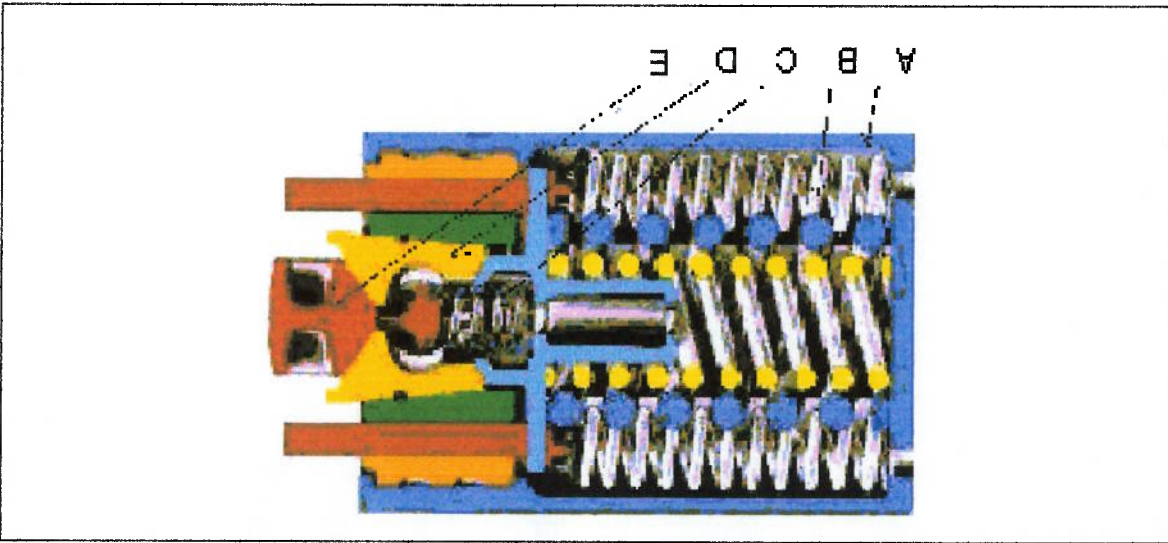
negociação em curvas. Ela pode levar ao desenvolvimento de esforços longitudinais entre os vagões, que, quando suficientemente grandes, podem quebrar o engate ou até mesmo levar o veículo ao descarrilhamento.

2.1.2 Aparelho de choque e tração

Os *aparelhos de choque e tração*, que são os elementos que exercem a função de amortecedor na dinâmica longitudinal da composição, são montados em série com a estrutura do vagão, de forma que as forças dos engates sejam amortecidas e transmitidas à estrutura do veículo. O *curso* do aparelho de choque e tração, é definido como sendo a máxima variação que pode ocorrer no seu comprimento, e quando este valor máximo é atingido, o aparelho de choque e tração torna-se uma conexão sólida, transmitindo os esforços do engate diretamente à estrutura da caixa do vagão.

Existem vários tipos de aparelhos de choque e tração projetados na indústria ferroviária, porém, a maioria deles utiliza atrito seco como mecanismo de dissipação de energia. Na Figura 2.2 é ilustrado um aparelho de choque e tração tipo mola/cunha de fricção, no caso, o tradicional Mark 50, e as partes que o compõem: (A) carga metálica, (B) mola principal, (C) mola de retorno, (D) cunha de fricção e (E) aplicador.

Figura 2.2 – Diagrama Esquemático de uma aparelho de Choque e Tração



Alguns autores, como DUKKIPATI (1984) e FELÍCIO (1983) propõem um modelo físico baseado em ensaios de impacto para representar o aparelho de choque e tração. No ensaio de impacto, um martelo é solto em queda livre sobre o aparelho de choque e tração a partir de diversas alturas e são medidas a força de reação ao impacto e correspondentes deslocamentos, conforme apresentado na Figura 2.3, chamada de curva da força x deslocamento.

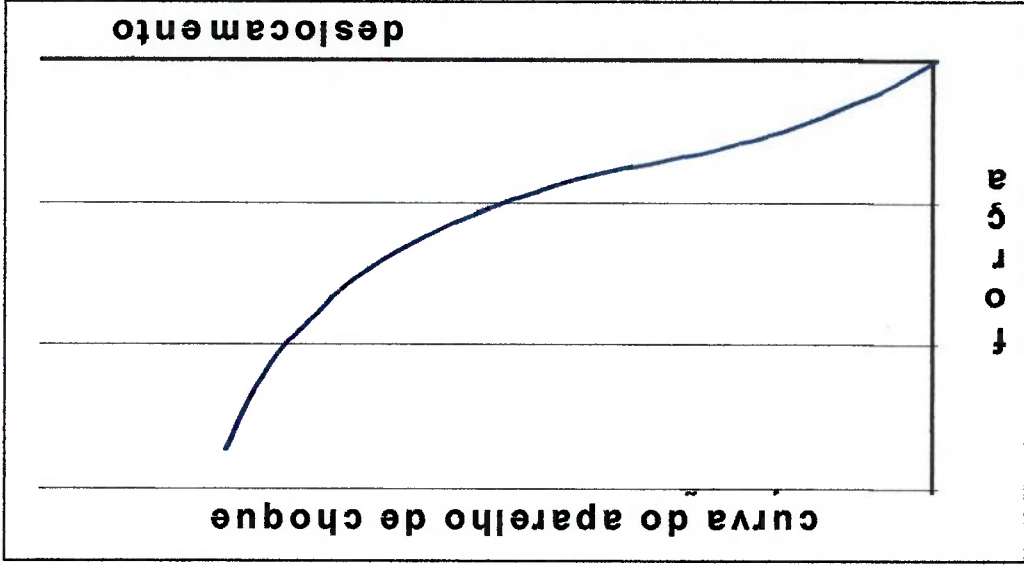


Figura 2.3 – Curva do Aparelho de Choque e Tração

No programa de simulação da dinâmica longitudinal, que é utilizado para testar o controlador fuzzy, o desempenho do aparelho de choque e tração é simulado utilizando a curva dada pela Figura 2.4. O gráfico do desempenho do aparelho de choque e tração é composto de três curvas: a curva azul representa a curva de reação ao impacto, que é desenvolvida com o aumento do curso do aparelho de choque e tração, a curva rosa representa o retorno, ou seja, quando o aparelho de choque e tração é aliviado e a curva verde correspondente à rigidez estrutural da caixa do vagão no sentido longitudinal.

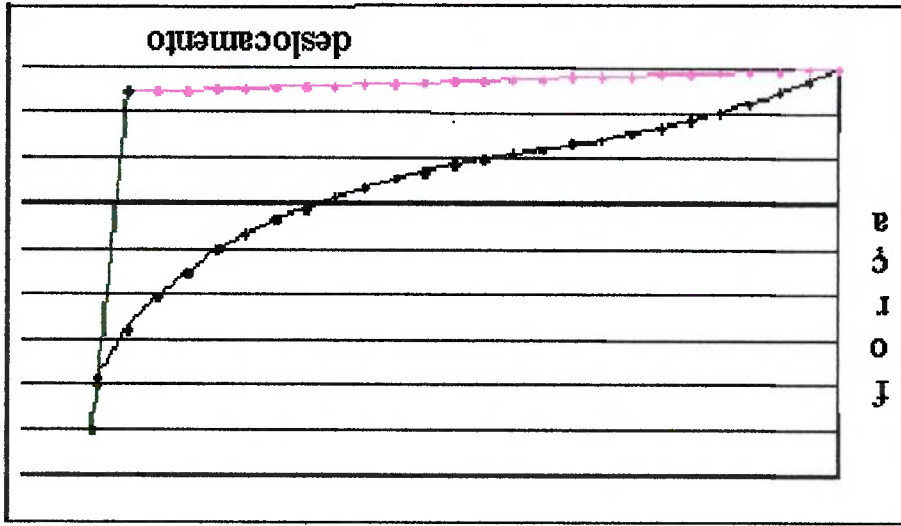


Figura 2.4 – Curva de Desempenho do Aparelho de Choque e Tração

Analisando a curva de força x deslocamento da Figura 2.4, é importante observar que, para um mesmo valor de deslocamento x^* , estão disponíveis dois valores de força: a força de carregamento F_A e a força de alívio F_B . Esse fato ocorre devido ao efeito de histerese da curva que caracteriza o acoplamento e, para simular-lo, é importante conhecer a história do deslocamento no instante anterior. Durante o ciclo de compressão/ tração do

aparelho de choque e tração, uma parte da energia absorvida das oscilações longitudinais é convertida em calor e não retorna ao sistema oscilatório.

É possível avaliar em teste de laboratório ou de campo a quantidade de energia perdida medindo as forças geradas em um ciclo completo do aparelho de choque e tração. Da energia retornada durante o processo de distensão subtrai-se a energia necessária para a compressão. A diferença de energia é a dissipada. É possível avaliar graficamente, pois a energia dissipada é a área entre a curva de carregamento e a curva alívio da força no gráfico de força x deslocamento, como mostra a Figura 2.5

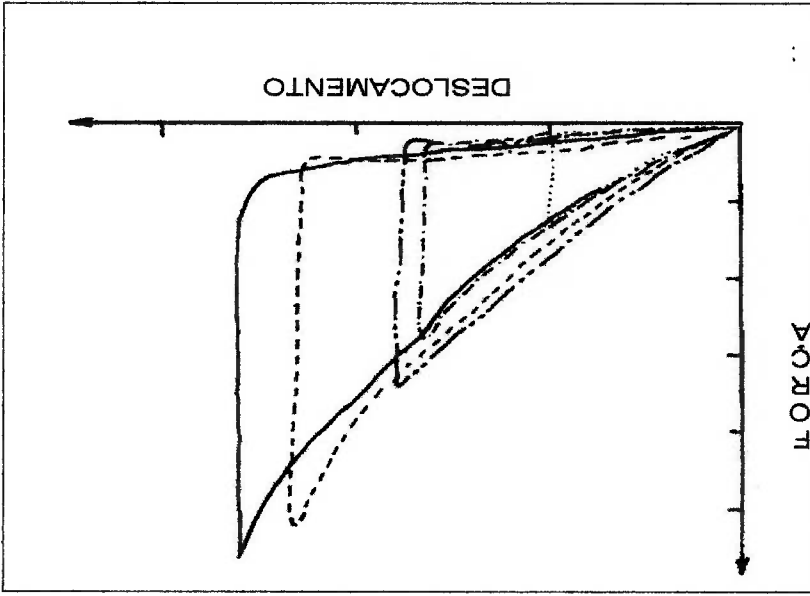


Figura 2.5 – Representação da Energia Dissipada (DUKKIPATI e AMYOT(1988).)

A quantidade de energia que pode ser armazenada pelo aparelho de choque e tração durante o processo de compressão é função de sua rigidez longitudinal e da quantidade de deflexão permitida. É importante ter o conhecimento da

capacidade de absorção do aparelho, pois quando o aparelho já tiver alcançado o seu limite máximo e não puder mais absorver a energia cinética de um impacto, a ocorrência de uma grande força longitudinal pode causar um deslocamento vertical no vagão com danos consideráveis. O equacionamento detalhado das forças do aparelho de choque e tração, com base na curva de força x deslocamento, é mostrado no próximo Capítulo.

2.2 Sistema de Freios Pneumáticos

A função do sistema de freios pneumáticos de uma composição ferroviária é reduzir a velocidade e/ou parar a composição, convertendo a energia cinética do trem em calor, que é dissipado através do contato da sapata de freio com as rodas. A Figura 2.6 apresenta um diagrama esquemático do sistema de freios pneumáticos, ou, freios a ar.

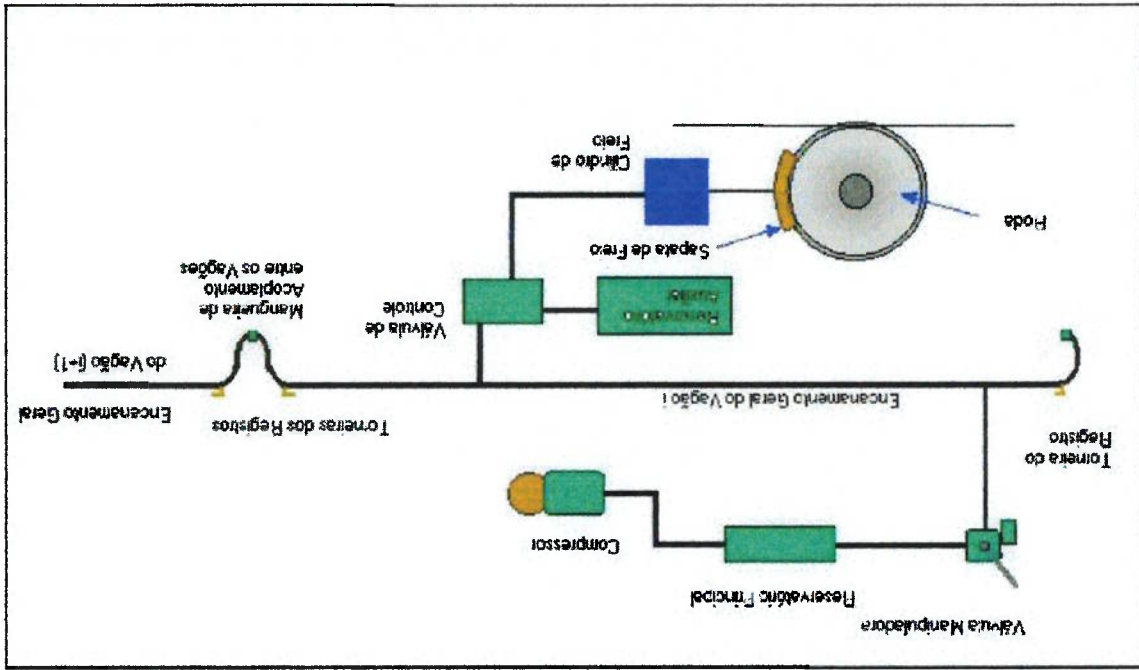


Figura 2.6 – Representação do Sistema de Freios

A atitude para aplicar freio ou reduzir de freio é tomada pelo maquinista e o acionamento é feito através da válvula manipuladora instalada na cabine da locomotiva. A *válvula manipuladora* tem várias funções, dentre elas aplicar frenagem de serviço, de emergência e de alívio. Para aplicar os freios, o maquinista reduz a pressão do encanamento geral, abrindo a *válvula manipuladora* à pressão atmosférica, provocando uma redução na pressão do encanamento principal. A *válvula de controle* existente em cada unidade de freio é acionada devido a redução de pressão no encanamento geral, permitindo que uma quantidade de ar flua do reservatório auxiliar para o *cilindro de freio* do vagão. Por causa da pressão exercida pelo ar comprimido, o *pistão do cilindro de freio* aciona a *timonaria de freio*, que pressiona a *sapata de freio* contra a pista de rolamento da roda. Esse tipo de aplicação de freio,

o cilindro de freio quando o freio é acionado.

Cada unidade de freio é provida de um *reservatório auxiliar* e de um *reservatório de emergência*, nos quais a pressão do ar é mantida à mesma pressão do ar do encanamento geral. Cada vagão possui uma *válvula de controle* que permite a entrada do ar para os reservatórios e direciona o ar para o cilindro de freio quando o freio é acionado.

O princípio básico de funcionamento do sistema de freios é o seguinte: na locomotiva encontra-se o *reservatório principal*, alimentado por um compressor, que fornece ar comprimido para a *unidade de freio*, localizada em cada vagão, através do *encanamento geral*, um tubo fixado ao longo do trem que transmite as variações de pressão necessárias para controlar o freio de cada veículo.

onde a redução na pressão é gradual, é chamada de *freagem de serviço* e

está ilustrado pela Figura 2.7.

O que difere a *aplicação de emergência* da aplicação de serviço, é que na aplicação de emergência é realizada uma grande redução de pressão no encanamento geral em um curto período de tempo, produzindo uma pressão máxima no cilindro do freio e, consequentemente, grandes forças de frenagem.

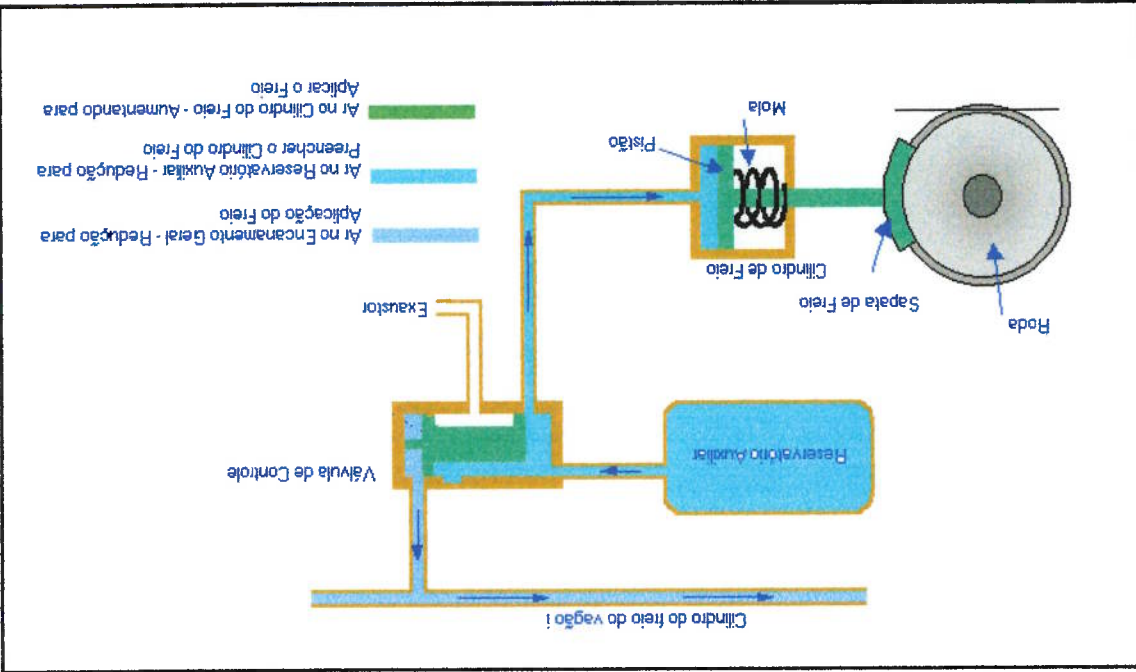


Figura 2.7 – Representação da Aplicação de Freios

No processo de *alívio de freios*, que também é realizado pelo maquinista, a pressão do encanamento geral é restabelecida e o reservatório auxiliar é recarregado. A válvula de controle faz com que o ar do cilindro do freio seja liberado à atmosfera, fazendo com que o pistão do cilindro do freio retorne à sua posição original, aliviando, assim, o esforço sobre as sapatas de freio.

É importante ressaltar que a força de frenagem real exercida pela sapata de freio em cada roda é função de:

O funcionamento do *sistema de tração*, de uma forma bastante simplificada, é iniciado no *motor diesel*, que trabalha acoplado ao *gerador*. O controle do grupo motor diesel-gerador é realizado por um sistema de controle da locomotiva denominado de *governador*, o qual controla a quantidade de combustível que o *motor* necessita para gerar, na saída do gerador, níveis

- motor diesel,
- gerador elétrico,
- motor de tração.

composta basicamente dos seguintes sistemas:

Esforço de tração é o nome dado para a força aplicada nos trilhos, pelas rodas do trem, para causar movimento. A dimensão desta força é determinada pelas características do sistema de potência das locomotivas e pela forma como o maquinista a utiliza. Atualmente no Brasil predominam as locomotivas diesel-elétricas. As locomotivas elétricas são pouco utilizadas. No modelo matemático utilizado neste estudo a locomotiva equacionada foi diesel elétrica, que é

2.3 Sistema de Tração

- eficiência da timoneria de freios,
- redução de pressão no encanamento geral,
- duração da aplicação do freio,
- posição do vagão em relação à locomotiva que é o ponto inicial da tração,
- característica da sapata de freio.

constantes de energia, que é o produto da tensão pela corrente do gerador. A corrente fornecida pelo gerador é utilizada pelos *motores de tração*, que estão montados nos eixos e estrutura dos truques. Os motores de tração acionam os rodéis, produzindo o esforço de tração, que, através dos engates, é transmitido aos vagões.

A Figura 2.8 de DUKKIPATI (1988) ilustra um esforço de tração típico.

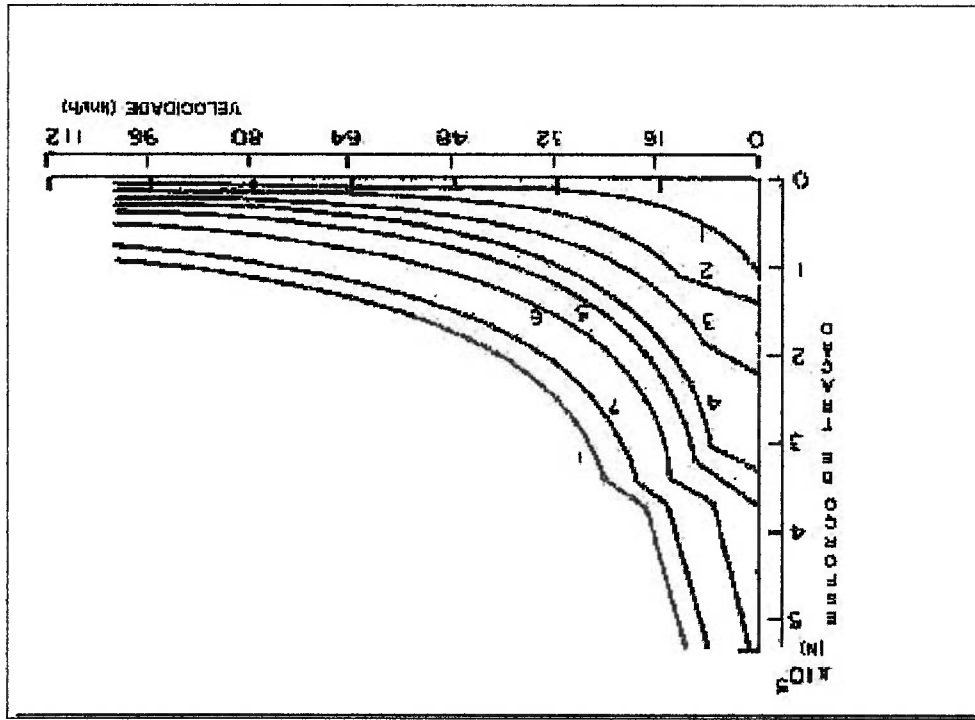


Figura 2.8– Esforço de Tração (DUKKIPATI e AMYOT(1988))

O esforço de tração, conforme indicado na figura 2.8, é calculado a partir da potência máxima dos motores de tração, que é fornecida pelo fabricante, e da velocidade. A curva relativa ao ponto 8 indica a potência máxima, medida

eletricamente no alternador, porém alguma potência é perdida tanto eletricamente, como mecanicamente, entre o alternador e os trilhos.

A curva do esforço de tração máximo, que corresponde ao ponto 8, em função da velocidade, é obtida multiplicando a potência do motor de tração por um fator de eficiência, parâmetro que dependendo do tipo de motor pode variar entre 300 a 275, e dividindo pela velocidade. As demais curvas são calculadas dividindo a curva de esforço máximo por 8 e a seguir multiplicando pelo ponto de tração desejado, entre 1 e 7.

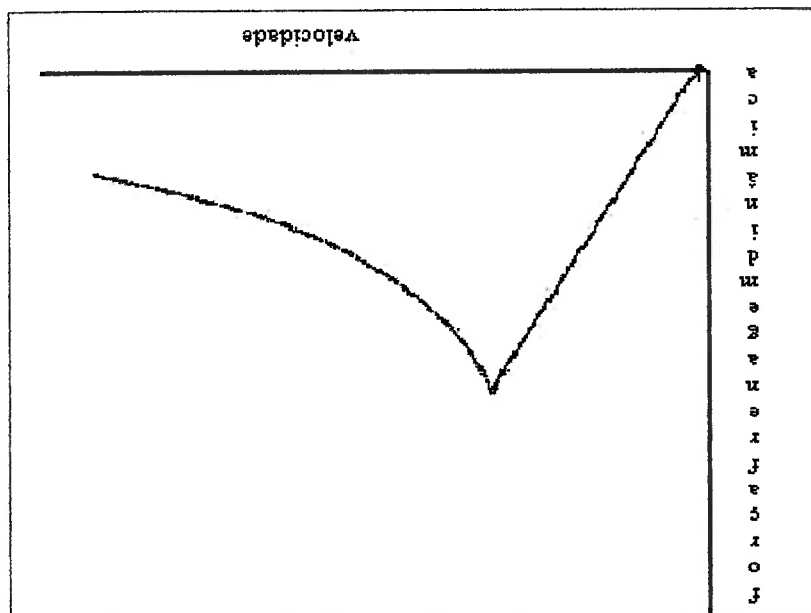
Apesar da principal função da locomotiva ser gerar esforço de tração para a composição, os motores de tração também podem ser utilizados, como um sistema de freios, para reduzir a velocidade da locomotiva. Esse procedimento é chamado de *freagem dinâmica* e é realizado através de uma mudança nas conexões dos motores de tração. O movimento de rotação de cada eixo é usado para acionar o motor de tração a ele associado, que passa a funcionar como se fosse um gerador. Assim, a eficiência do freio dinâmico depende da capacidade dos motores de tração, enquanto agindo como geradores, em converter a energia cinética do movimento do trem em energia elétrica e dissipa-la em forma de calor nos bancos de resistores.

A Figura 2.9, de DUKKIPATI e AMYOT (1988) ilustra a força de frenagem dinâmica máxima fornecida por eixo, considerando dois motores por eixo. O limite da força de retardamento é fornecido pela corrente do motor de tração e,

Considerando, que para modelar o sistema de controle da locomotiva, levando em conta todos os subsistemas que compõem o governador, motor diesel, gerador e motores de tração, adotou-se um modelo simplificado, o qual é baseado na potência do motor diesel, utilizando as curvas $V \times I_g$ (tensão x corrente do gerador) e as curvas $V \times I_a$ (tensão x corrente de armadura) dos motores de tração.

Na modelagem matemática adotada foi também considerado o conceito de *limite de aderência*, que pode ser definido como sendo o limiar onde as rodas deixam de transmitir os esforços de tração e passam a patinar. O limite de aderência é definido como sendo o produto do peso da locomotiva pelo coeficiente de atrito estático entre a roda e o trilho.

Figura 2.9 – Esforço de Frenagem Dinâmica (DUKKIPATI e AMYOT(1988).)



de forma similar ao ponto de tração, o ponto de freio dinâmico pode ser escolhido como sendo uma tração do valor máximo.

2.4 Via Férrea

O desempenho de uma operação ferroviária depende fortemente das condições da via férrea. Operações mal conduzidas, carregamentos incorretos e falta de manutenção são as principais causas que levam a um processo de deterioração.

A via férrea é um sistema composto basicamente pelos trilhos, dormentes e lastro.

O peso dos veículos é transmitido pelas rodas aos trilhos. Os trilhos são apoiados nos dormentes, que são vigas transversais distribuídas em espaços regulares ao longo da via. Os dormentes normalmente são de madeira, concreto ou aço.

Os dormentes apoiam-se sobre o lastro, que é uma base feita de pedra britada, e que tem a função de distribuir o peso do trem para a infra-estrutura e também ancorar a via nos sentidos transversal e longitudinal.

Para efeito deste estudo, as características importantes da via são as que afetam diretamente a resistência ao movimento do trem, que são dados pelos aclives, declives e pelo raio de curvatura da via.

Definido o percurso da viagem, a via deve ser dividida em trechos, nos quais as características permanecem constantes. No modelo matemático adotado é

necessário conhecer características da via para a posição de cada veículo

(vagão e locomotiva) da composição.

Os dados da via foram transformados em um arquivo, identificado por trechos,

que contém as seguintes informações:

- início do trecho,
- fim do trecho,
- inclinação vertical da via, em porcentagem,
- raio de curvatura.

3. OBTENÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA DINÂMICA LONGITUDINAL

3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é formular o modelo matemático não-linear que descreve o comportamento da dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária de carga, em operação sob as mais diversas formas de perturbações externas que podem ocorrer em uma viagem típica. Para tal desenvolvimento, considera-se primeiramente um modelo físico, a partir do qual é delimitado o modelo matemático para as equações de movimento da composição. Esse equacionamento é necessário para simular o comportamento da composição, quando operada pelo controlador fuzzy, possibilitando a estimativa dos esforços nos engates, velocidade do trem, tempo de viagem, consumo de combustível, etc., visto que não será possível testar o controlador em uma composição real.

Para efeito de simplificação, na obtenção do modelo matemático foram feitas as seguintes considerações:

- a) A cada veículo da composição é permitido somente um grau de liberdade, no sentido longitudinal;
- b) Os truques são considerados rígidos e efeitos de suspensão são negligenciados;

c) Efeitos devidos às irregularidades da via ou desgaste de roda não são considerados;

d) Assume-se que a estrutura da caixa do vagão é elástica;

e) A carga do vagão é assumida como integrada ao vagão e com distribuição uniforme;

f) Não são levados em conta os esforços entre os veículos provocados por desalinhamentos dos engates;

g) A dinâmica longitudinal de cada veículo independe da posição vertical de seu centro de massa.

3.2 Delimitação do Modelo Matemático

O trem é modelado como um conjunto de massas, interligadas por elementos de molas e amortecedores, Figura 3.1, representando os engates e aparelhos de choque e tração, possibilitando analisar o comportamento da composição como um todo ou, ainda, cada veículo individualmente.

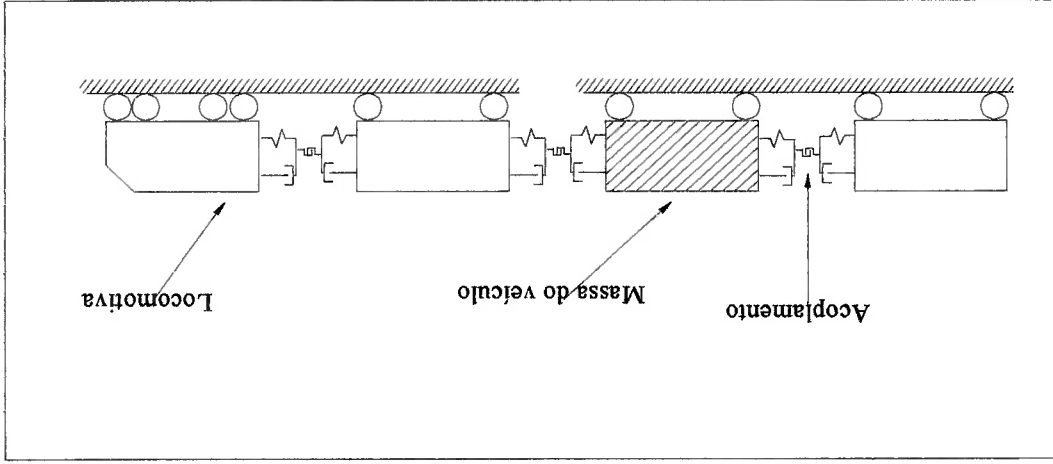


Figura 3.1 - Representação Esquemática de uma Composição Ferroviária

Identificando os veículos por (i), (i+1) e os acoplamentos, que os interligam, por (j-1), j, (j+1), esse conjunto de veículos e acoplamentos pode ser representado

pelo modelo físico da Figura 3.2.

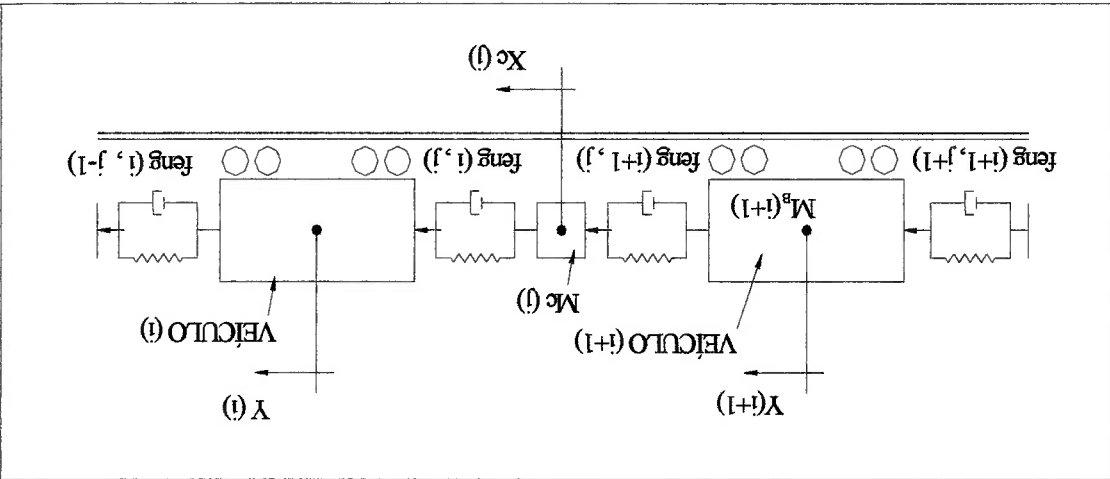


Figura 3.2 - Modelo Físico dos Engates e Veículos

Aplicando a segunda lei de Newton ao veículo i e ao acoplamento j, obtêm-se o seguinte par de equações diferenciais não lineares de 2ª ordem.

$$(M_{a_i} + m_{e_j}) \ddot{Y}_i = F_{eng_{ij}} - F_{eng_{i,j-1}} + \left(\sum_k P_k \right)_i \quad (3.1)$$

$$M_{c_j} \ddot{X}_{c_j} = F_{eng_{i+1,j}} - F_{eng_{ij}} \quad (3.2)$$

onde:

- i: número do veículo (numerado do início para o fim do trem),
- j: número do engate e aparelho de choque e tração,
- n_j: quantidade de engates,
- N_t: número total de veículos (vagões e locomotivas),

M_B : massa do veículo (vagão ou locomotiva) (kg),
 m_e massa translacional equivalente às inércias de rotação (kg),
 M_e : massa móvel do engate (kg),
 Y_i : deslocamento absoluto do veículo i (m),
 X_{g_j} : deslocamento absoluto da massa móvel do engate j (m),
 F_{eng} : Força do aparelho de choque e tração (tf),
 $\sum P_k$: somatório das forças externas que agem em cada veículo na direção longitudinal (tf).

3.2.1 Descrição das forças do aparelho de choque e tração

Considerando que a massa móvel do engate, representada na equação (3.2) por M_e , é muito pequena em relação às massas do veículo, então é possível desprezar seus efeitos dinâmicos e a equação fica reduzida à forma:

$$F_{eng_{i+1j}} = F_{eng_{ij}} \quad (3.3)$$

Assumindo ainda que todos os aparelhos de choque e tração são idênticos, então é possível agrupar os aparelhos (i,j) e ($i+1,j$) em um único equivalente e definir a força no acoplamento (agora formado por dois engates e dois aparelhos de tração), ($F_{eng_{i+1j}}$), como sendo a força que age sobre o veículo i , na direção positiva de Y_i , causada pelo aparelho de choque e tração, entre o veículo i e o veículo ($i+1$). Desse modo, a equação (3.2) pode ser eliminada e a equação (3.1) fica escrita como:

As forças de acionamento são as forças provenientes das locomotivas e que acionam a composição. No modelo adotado, as forças podem ser de tração, que aciona a composição no sentido

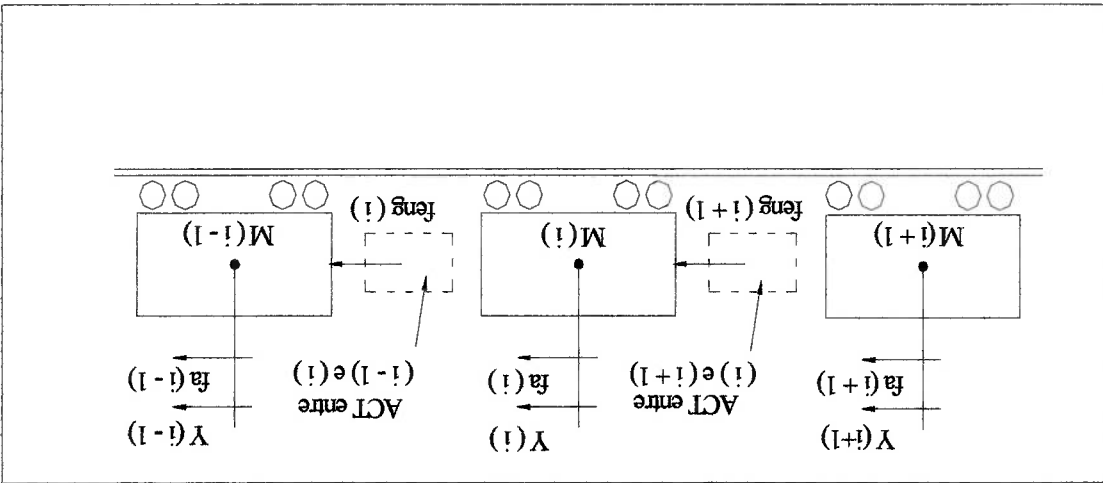
a) Força de Acionamento (FA)

externas, que agem na direção longitudinal do veículo i. Essas forças são:

O termo $\sum_k^k P_k$, da equação (3.4), representa a soma algébrica de forças

3.2.2 Descrição das forças externas

Figura 3.3 – Modelo Físico Final



O modelo físico final do sistema fica como representado pela Figura 3.3.

$$M = M_b + m_e + M_c \quad (3.5)$$

onde M representa a massa total, ou seja:

$$M_i \ddot{Y}_i = F_{eng_{i+1}} - F_{eng_i} + \left(\sum_k^k P_k \right)_i \quad (3.4)$$

positivo do deslocamento, ou força de frenagem dinâmica, que atua a composição no sentido negativo do deslocamento.

b) Forças de Frenagem (FF)

No modelo matemático adotado foram considerados os seguintes

tipos de frenagem:

- i) frenagem de emergência,
- ii) frenagem de serviço,
- iii) frenagem independente da locomotiva

c) Forças de Resistência ao Movimento (FR)

Foram consideradas as seguintes forças de resistência ao

movimento:

- i) resistência devida à inclinação da via,
- ii) resistência devida à curvatura da via,
- iii) resistência devida à partida da composição,
- iv) resistência devida ao rolamento.

A expressão final para as forças externas é:

$$\sum^k P_k)_l = FA_l - FF_l - FR_l \quad (3.7)$$

3.3 Equacionamento do Aparelho de Choque e Tração

Na modelagem matemática da dinâmica longitudinal de um trem, os engates e os aparelhos de choque e tração são os responsáveis pela conexão entre os veículos, conforme exemplificado pela Figura 3.2.

Para simular o comportamento do aparelho de choque e tração na dinâmica longitudinal é utilizada a curva da força desenvolvida no aparelho de choque em função do deslocamento. Essas curvas de força x deslocamento são obtidas a partir de ensaios de impacto. Neste trabalho foi utilizada a curva de desempenho do aparelho de choque e tração A-22-XL, Figura 3.4, testada sob um martelo com capacidade de 12,25 tf. Neste teste a força máxima de reação foi de 136,00 tf, o curso máximo foi de 63,5 mm e a capacidade de absorção de energia foi de 2,74 tf.m, que representa 88% da capacidade do aparelho de choque e tração.

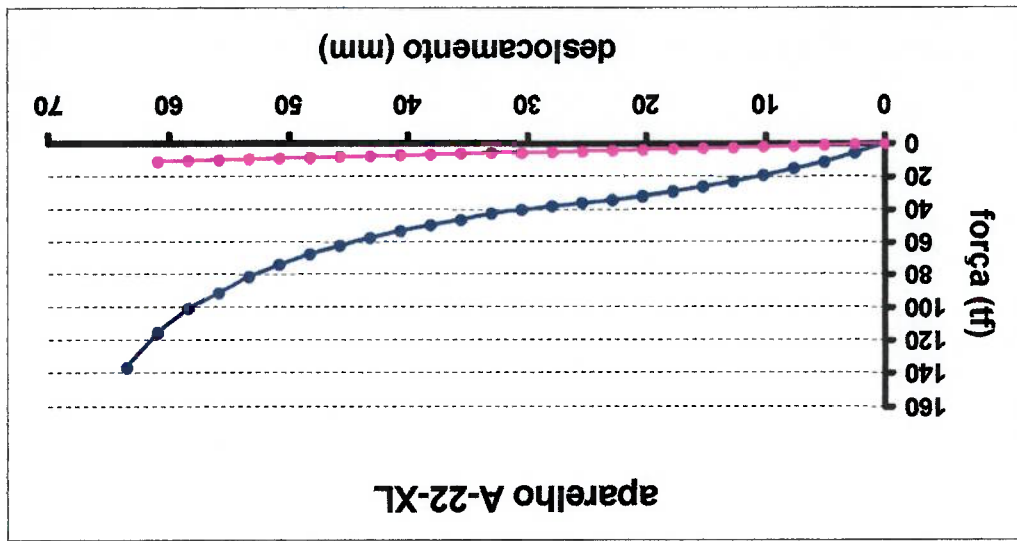


Figura 3.4 – Curva de Desempenho do Aparelho de Choque e Tração A-22-XL

Considerando as observações realizadas tanto por FELLICIO (1984) quanto por BARBOSA (1993), é importante ressaltar algumas características importantes do acoplamento entre dois veículos realizado pelo conjunto engate e aparelho de choque e tração e ilustradas pela Figura 3.5:

a) O aparelho de choque e tração é montado na estrutura do veículo, de modo a poder trabalhar tanto em tração como em compressão. Assim, a curva de desempenho força x deslocamento, apresentada no primeiro quadrante, pode ser rebatida e espelhada para o terceiro quadrante, ou seja para valores negativos de deslocamentos. Na Figura 3.5 as curvas de carregamento são representadas pelas curvas A e E e as curvas de alívio são representadas pelas curvas B e D.

b) O intervalo (- ϵ , ϵ) no eixo dos deslocamentos representa a folga do engate, que permite o movimento relativo entre os dois veículos. Neste caso, foi adotado $\epsilon = 6$ mm.

c) Para realizar a conexão entre dois veículos são necessários dois engates e dois aparelhos de choque e tração montados em série; logo, o valor da rigidez de um acoplamento equivale à metade do valor da rigidez de um único aparelho de choque e tração.

d) Para deslocamentos maiores que o curso máximo do aparelho de choque e tração, foram adotadas curvas de prolongamento, cujas inclinações são

idênticas à rigidez longitudinal da estrutura da caixa do vagão. Na figura 3.5, estão indicadas pelas curvas C e F.

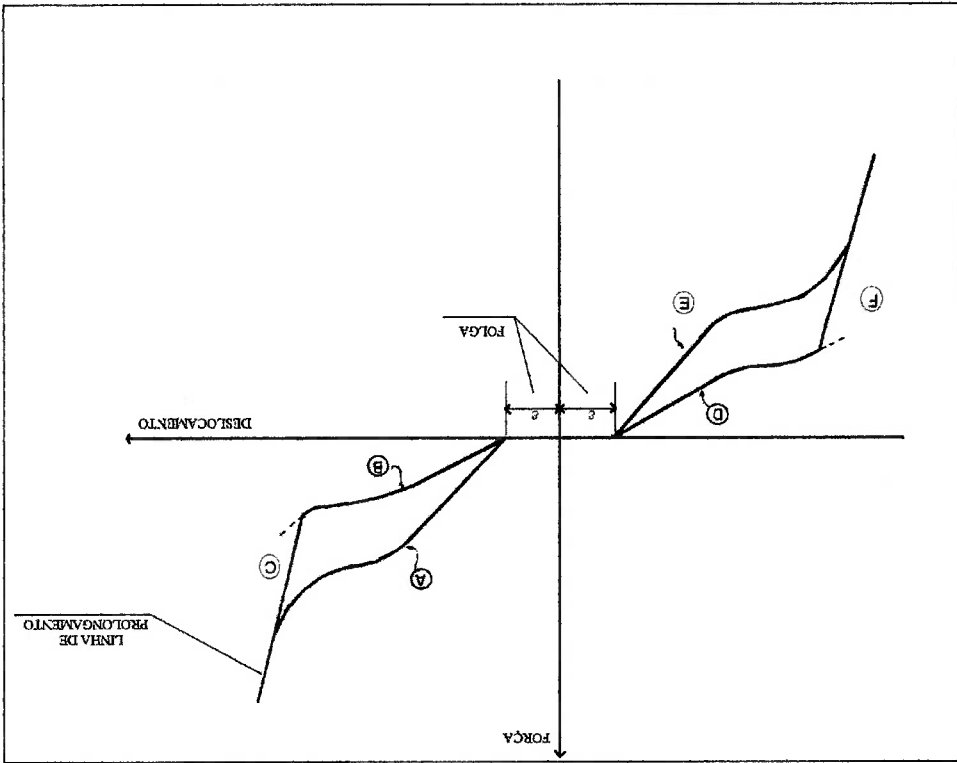


Figura 3.5 Detalhes Adicionados à Curva de Impacto

e) As curvas B e D, têm início na reta de prolongamento descrita no item (d)

f) Como a curva de crescimento da força no aparelho de choque e tração é

diferente da curva de alívio, então, para completar os ciclos de histerese intermediários, foram adotadas retas unindo as curvas A e B (assim como as curvas D e E), com a mesma inclinação do prolongamento do item (iii),

Figura 3.6. Para exemplificar, consideremos os seguintes caminhos de deslocamentos de x_1 para $x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, e, x_{10}$. O ponto no plano força (F) x deslocamento (x) varia de 1 para 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10,

sucessivamente.

As curvas características foram segmentadas em trechos, que foram ajustados

por retas e parábolas.

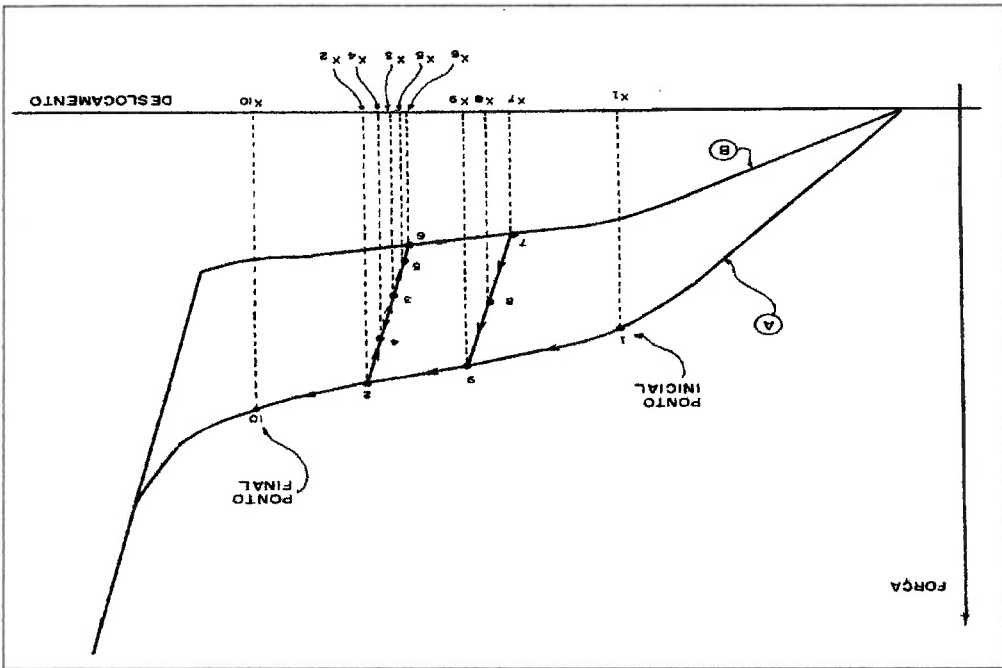


Figura 3.6 – Representação do Efeito de Histerese do Aparelho de Choque e

Tração

Para reproduzir o efeito de histerese, ou seja, simular o efeito dissipativo de energia causado pelo ciclo de histerese, foi adotado o seguinte procedimento:

- i) Em cada passo de integração do programa é necessário conhecer o deslocamento atual do engate, x_{atual} , e o deslocamento e a respectiva força no engate (X_{ant} , F_{engate}) ocorridos no instante anterior. O conhecimento do ponto anterior (X_{ant} , F_{engate}) é importante para definir a posição do ponto atual em relação aos vários ciclos de histerese;
- ii) traça-se uma reta L com inclinação k_s , que corresponde à rigidez longitudinal da estrutura do veículo, pelo ponto anterior (X_{ant} , F_{engate});

longitudinal da estrutura do veículo, pelo ponto anterior (X_{ant} , F_{engate});

As forças de resistência à inclinação da via ocorrem quando a composição desce ou sobe uma rampa e são causadas pela componente longitudinal da força peso. É calculada como:

3.4.1 Resistência devido à inclinação da via

- resistência à partida.
- resistência ao rolamento,
- resistência devida à curvatura da via,
- resistência devida à inclinação da via,

Neste tópico serão equacionadas as forças de resistências ao movimento que contribuem para a modelagem da dinâmica longitudinal de um trem. A cada passo de integração, são calculadas individualmente, para cada veículo, em função de sua posição na via, as seguintes forças:

3.4 Equacionamento das Forças de Resistência ao Movimento

Raciocínio idêntico deve ser seguido para as curvas do terceiro quadrante.

- (1) se $F_B \leq F_L \leq F_A$ então $F_{eng}(X_{atual}) = F_L$
- (2) se $F_L > F_A$ então $F_{eng}(X_{atual}) = F_A$,
- (3) se $F_L > F_B$ então $F_{eng}(X_{atual}) = F_B$.

iv) os valores calculados em (iii) são comparados de forma que:

$$L, F_L;$$

relativas às curvas A e B, F_A e F_B respectivamente, e em relação a reta

iii) considerando o deslocamento atual X_{atual} , calcula-se as forças de engate

O sinal positivo é adotado para perfil ascendente.

3.4.2 Resistência à partida da composição

A força de resistência à partida ocorre quando a composição sai do estado de repouso e inicia o movimento. Ela é causada pelos atritos estáticos dos mancais e dura até o instante em que o veículo atinge uma velocidade crítica, a partir do qual a força de resistência ao rolamento passa atuar.

$$FR_{part} = (rp_1 + rp_2 \cdot V) W \quad (3.10)$$

onde:

- rp₁, rp₂ - coeficientes de resistência à partida
- V - velocidade do veículo,
- W - peso do veículo (W = Mg).

onde

$$FR_{peso} = \pm M g \text{sen}(\alpha) \quad (3.9)$$

força de resistência devido à inclinação da via para o veículo;

- g - aceleração da gravidade,
- M - massa total veículo,
- α - ângulo da inclinação da via.

3.4.3 – Resistência devida ao rolamento

A força de resistência ao rolamento, que também é conhecida como fórmula de Davis, é a força que se opõe ao movimento da composição. Ela é composta basicamente por duas parcelas:

- força devida à resistência do vento,
- força devida aos atritos que ocorrem entre a roda e o trilho e rolamentos.

A soma dessa duas forças é expressa como:

$$FR_{rol} = (A + B.n + C.V)W + DV^2 \quad (3.11)$$

onde:

- FR_{rol} : força de resistência ao rolamento,
W: peso do veículo ($W = Mg$),
V: velocidade do veículo,
A: coeficiente de resistência ao rolamento,
B: coeficiente de resistência devida ao atrito nos mancais,
C: coeficiente de resistência devida à flange da roda,
D: coeficiente de resistência aerodinâmica,
n: número de eixos do veículo.

3.4.4 Resistência à curvatura da via

As forças de resistência à curvatura da via ocorrem durante a negociação da curva, pelas restrições fornecidas pela curvatura da via ao rodéiro. São,

geralmente, forças de resistência ao movimento provocadas por atrito entre o

triso da roda e o boleto do trilho. É dada por:

$$FR_{curv} = \frac{MgK_R}{R}$$

(3.12)

onde:

FR_{curv} : força de resistência à curvatura,

M peso do veículo,

g Aceleração da gravidade,

R raio da curva,

K_R constante de proporcionalidade.

3.5 Equacionamento das Forças de Frenagem

O sistema de freios pneumáticos, já descrito anteriormente, é equacionado neste item. A modelagem adotada para equacionar a pressão no cilindro do freio foi baseada na metodologia desenvolvida por FELICIO (1984), que discretizou o comportamento do sistema de freios para as aplicações de serviço e emergência, e por BARBOSA (1993) que identificou os termos de polinômios que descrevem a forma de crescimento da pressão no cilindro do freio para diversos tipos de aplicação de frenagem. Os coeficientes dos polinômios são função das características do trem e da posição do veículo em relação ao ponto inicial da aplicação de freio.

A Figura 3.7 apresenta a curva da pressão no cilindro do freio em função do tempo dividida em quatro segmentos, conforme modelada por Barbosa (1993).

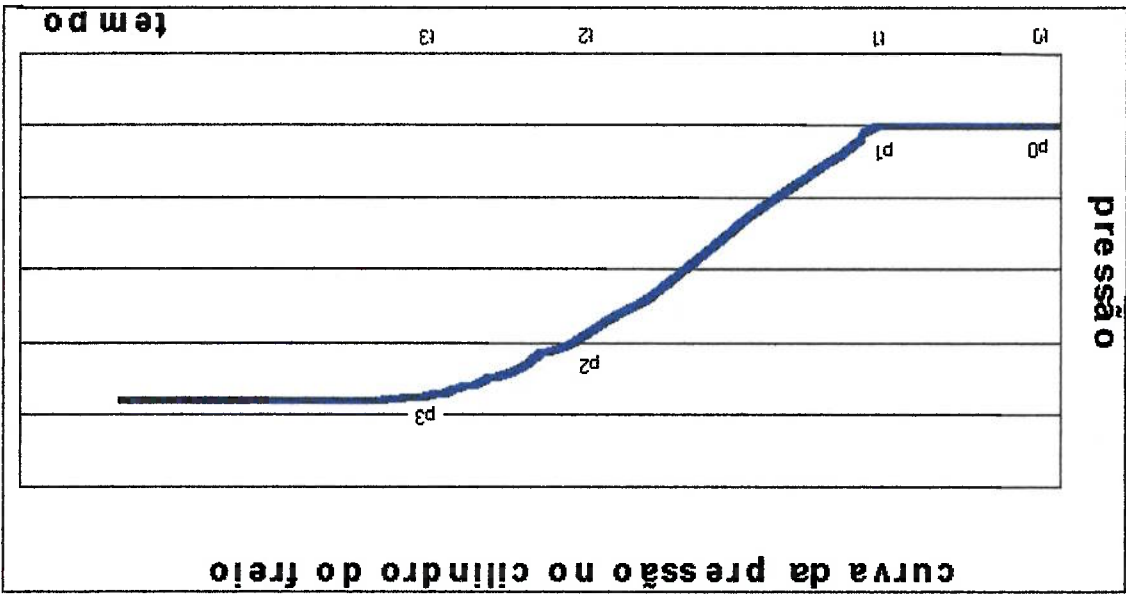


Figura 3.7 - Pressão no Cilindro do Freio

Na Figura 3.7 é possível identificar quatro trechos. O primeiro trecho, que compreende o intervalo de tempo que vai do instante inicial t_0 , em que o maquinista aciona o freio na locomotiva, até o instante t_1 , em que é iniciado o crescimento da pressão. Neste período de tempo, a pressão permanece nula.

No segundo trecho, que vai do instante t_1 até t_2 , a curva de crescimento da pressão é linear e corresponde ao maior tempo de aplicação.

No terceiro trecho, do instante t_2 até t_3 , a curva de crescimento é ajustada por um polinômio de segundo grau.

O último trecho, que corresponde ao intervalo de tempo em que a pressão permanece constante, é iniciado em t_3 , quando o cilindro do freio está totalmente cheio e termina com a aplicação de alívio.

A força de frenagem obtida para cada vagão i , considerando os efeitos de propagação descritos é:

$$FF_i = \mu_{RS} \cdot P_{Bi} \quad (3.13)$$

e

$$P_{Bi} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot (P_{cf} - P_s) \cdot n_c \cdot E \cdot \eta \quad (3.14)$$

onde:

FF_i : força de retardamento do veículo i ,

μ_{RS} : coeficiente de atrito entre a roda e a sapata, que varia em função da velocidade,

P_{Bi} : força normal devido a aplicação da sapata de freio,

D : diâmetro do pistão do cilindro do freio,

P_{cf} : pressão do cilindro do freio relativa ao veículo i . O valor da pressão é função do tempo, da posição do veículo na composição

e tipo de frenagem aplicada,

P_s : pressão equivalente, relativa à força da mola de retorno,

N_c : quantidade de cilindros de freio por vagão,

E : fator de ampliação entre cilindro e sapata,

η : rendimento mecânico do sistema de timoneria,

A : área do cilindro do freio.

As equações (3.13) e (3.14) devem ser utilizadas para o cálculo das forças de frenagens se as seguintes condições abaixo forem satisfeitas:

- a) $(P_{cr} - P_s) > 0$ para qualquer veículo;
- b) F_f deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo da força de atrito entre a roda e o trilho;
- c) A velocidade da composição deve ser sempre positiva.

No simulador de operação ferroviária também estão equacionadas a aplicação de alívio, aplicação de freio dinâmico da locomotiva e aplicação de freio pneumático independente para a locomotiva.

- **Aplicação de alívio**

A curva que define a aplicação de alívio da pressão no cilindro do freio é dada por:

$$P_{ctf} = P_0 + P_{ctant_i} \cdot e^{(\beta \cdot t_i)} \quad (3.15)$$

onde:

P_{ctf} : pressão aliviada no cilindro do freio do vagão i , (psi)

P_0 : constante de ajuste de curvas,

P_{ctant_i} : pressão aplicada no cilindro do freio do vagão i antes do alívio (psi),

β : constante que define o decaimento,

t_i : tempo de atraso de aplicação de alívio para o vagão i (s).

- **Frenagem independente da locomotiva**

A atuação do freio independente da locomotiva foi modelada considerando que o comando de acionamento é efetuado pelo maquinista, que introduz diretamente o valor da pressão que deseja injetar nos cilindros de freios.

A curva adotada para o coeficiente de atrito entre a sapata e a roda, é função da dependência da força de aplicação, velocidade inicial de aplicação e da velocidade instantânea do trem.

A força de frenagem independente da locomotiva é equacionada como:

$$FR_L = A \cdot P_{cf} \cdot b \cdot \mu \cdot \frac{100}{e_f} \cdot n_c \quad (3.16)$$

onde:

- A: área do cilindro de freio da locomotiva,
- P_{cf} : pressão aplicada no cilindro de freio pelo maquinista,
- b: relação de alavanca da locomotiva,
- μ : coeficiente de atrito,
- e_f : eficiência da timonaria,
- n_c : número de cilindros de freio da locomotiva.

4. CONCEITOS DE LÓGICA FUZZY

4.1 - Introdução

Desde 1994, quando Zadeh propôs a denominação de "soft computing" para todo o campo de Inteligência Artificial que engloba lógica fuzzy, rede neurais, algoritmos genéticos e a combinação destes assuntos, que lógica fuzzy passou a ser classificada como mais uma técnica de Inteligência Artificial.

Na literatura matemática é possível encontrar dois tipos de definições para a lógica fuzzy. Em uma conceituação mais restrita, lógica fuzzy é classificada como uma lógica de raciocínio aproximado, e que pode ser vista como uma extensão ou generalização da lógica de multi-valores. Em uma conceituação mais ampliada, que está se tornando predominante, a lógica fuzzy é entendida como uma extensão à teoria de conjuntos fuzzy, isto é, à classe de objetos nos quais a transição entre pertinência e não-pertinência é realizada de forma gradual e contínua. Dessa forma, qualquer conjunto real X pode ser *fuzzyficado* e passará a ser chamado de conjunto fuzzy X , através da substituição do conceito clássico de conjunto X , pelo conceito de conjunto fuzzy X .

Neste capítulo estão reunidas as definições e os resultados mais relevantes em teoria de conjuntos e de lógica fuzzy segundo WANG (1994), ANDRADE (1997), KENDEL (1992), ZADEH (1973), LEE (1990) e JAGER (1995).

Primeiramente, são revisitos alguns conceitos da teoria de conjuntos, que servem de base para o desenvolvimento da lógica clássica, e, a seguir, estes conceitos são reformulados para a teoria de conjuntos fuzzy, como forma de preparar uma base para desenvolvimento dos sistemas e controladores dos capítulos subsequentes.

4.2 Teoria de Conjuntos Clássica

Neste tópico são lembrados os conceitos básicos de teoria de conjuntos clássica, os quais ganham uma outra definição no desenvolvimento da teoria de lógica fuzzy.

4.2.1 Operações nos conjuntos

As principais operações realizadas com conjuntos em lógica clássica são:

- *União* : $S \cup T = \{x \mid x \in S \text{ ou } x \in T\}$ (4.1)
- *Interseção*: $S \cap T = \{x \mid x \in S \text{ e } x \in T\}$ (4.2)
- *Complementar*: $\bar{X} = \{x \mid x \notin X\}$ (4.3)
- *Produto Cartesiano*: $A \times B = \{(a,b) \mid a \in A \text{ e } b \in B\}$ (4.4)

O produto cartesiano do conjunto A com o conjunto B, indicado por $A \times B$, é o conjunto formado por todos os pares ordenados através da combinação de um elemento de A com um elemento de B.

4.2.2 Relações e funções

- A relação $R(s,t)$, é uma associação ou uma propriedade, entre dois ou mais objetos. Formalmente, define-se uma relação R entre um conjunto S e um conjunto T , se para todo $s \in S$ e $t \in T$, $R(s,t)$ for verdadeira ou falsa. O produto cartesiano é um exemplo de relação.

- *Domínio de uma Relação*: $\text{Dom}(R)$

O domínio de uma relação R (dos conjuntos S e T) é um subconjunto do conjunto S , para o qual R relaciona algum elemento de S com algum elemento de T .

- *Contra Domínio*: $\text{Ran}(R)$

O contra domínio de uma relação R (dos conjuntos S e T) é um subconjunto de T , para o qual R relaciona algum elemento de S a algum elemento de T .

- *Função*: f

Uma função f de S em T é uma forma especial de relação na qual existe um único elemento de T correspondendo à qualquer elemento de S . O conjunto de todos os mapeamentos de S em T é notado como:

$$S \rightarrow T = \{f \mid x \text{ em } S \Rightarrow f(x) \text{ em } T\}. \quad (4.5)$$

4.2.3. Conjuntos indicadores de função

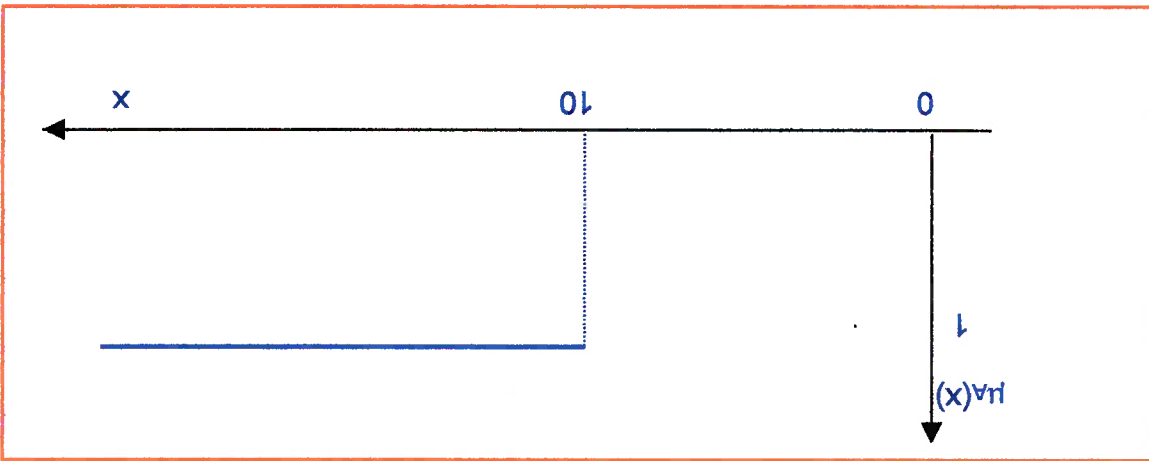
Considerando o subconjunto A de R :

$$A \subset R = \{x \mid x \in R \text{ e } x \geq 10.0\}$$

Os conceitos relacionados à conjuntos fuzzy, fornecidos a seguir, formam uma base para o tratamento e manipulação de conceitos vagos ou imprecisos.

4.3 Teoria de Conjuntos Fuzzy

Figura 4.1 - Representação do Conjunto A



$$(4.6) \quad \mu_A(x): \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\} = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

A expressão " $x \geq 10$ " é um predicado, representando uma função de x , que pode assumir os valores de " verdadeiro " ou " falso ". Associando 1 a verdadeiro e 0 a falso, então é possível expressar o conjunto A , conforme a Figura 4.1: A função $\mu_A(x)$, indicada na Figura 4.1, é um indicador de pertinência, que recebe o nome de *função pertinência* e assume valores iguais a 1 para todos os pontos de A e valores 0 para \bar{A} ,

4.3.1 Definição de conjuntos fuzzy

Dado um conjunto X , denominado de universo de discurso, por exemplo $X = \mathbb{R}$, um *conjunto fuzzy* A em X é caracterizado por uma função pertinência, a qual associa a cada elemento x de X , um valor $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$, que representa o grau de pertinência de x em A .

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1], \quad (4.7)$$

Um conjunto fuzzy pode ser visto como uma generalização do conceito clássico de conjunto, no qual a função pertinência assume somente os valores 0 e 1. Assim, um conjunto fuzzy A em X pode ser representado como um conjunto de pares ordenados, o qual é formado por um elemento genérico x e seu grau de pertinência em A , $\mu_A(x)$:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (4.8)$$

Quando o conjunto X é discreto, o conjunto fuzzy A pode ser representado por:

$$A = \sum_{i=1}^m \mu_A(x_i) / x_i = \mu_A(x_1) / x_1 + \dots + \mu_A(x_m) / x_m \quad (4.9)$$

Por exemplo, seja $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ e A é "conjunto de números pequenos". Então é possível escrever uma expressão como:

$$A = 1/0 + 1/1 + 0.8/2 + 0.5/3 + 0.1/4$$

onde o termo 0.8/2 significa $\mu_A(2) = 0.8$

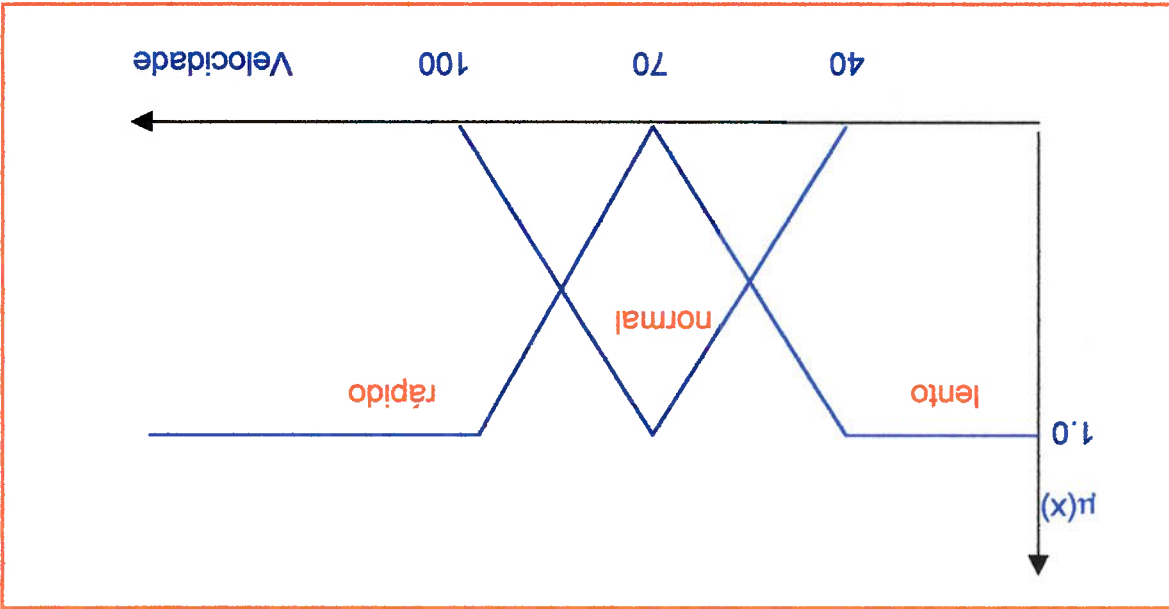
Quando o conjunto X é contínuo, o conjunto fuzzy A pode ser escrito de uma forma concisa como:

O objetivo dessa seção é fornecer os principais conceitos e propriedades da teoria de conjuntos fuzzy, necessárias para um bom entendimento do trabalho desenvolvido no Capítulo 6.

4.3.2 Propriedades

de um Carro

Figura 4.2 – Funções Pertinência de Três Conjuntos Fuzzy para a Velocidade



A Figura 4.2 mostra as funções pertinências de três conjuntos fuzzy, chamadas de "lento", "médio" e "rápido" para a velocidade de um carro. Neste exemplo, o universo de discurso são todas as possíveis velocidades de um carro, ou seja $X=[0, V_{max}]$, onde V_{max} é a máxima velocidade de um carro.

$$A = \int_0^x \mu_A(x) / x$$

(4.10)

Para as definições a seguir, X representa uma coleção de objetos, denotados genericamente por $\{x\}$, que pode ser discreta ou contínua. Neste caso, X é denominado de *universo de discurso*. As definições fornecidas a seguir estão representadas na figura 4.3.

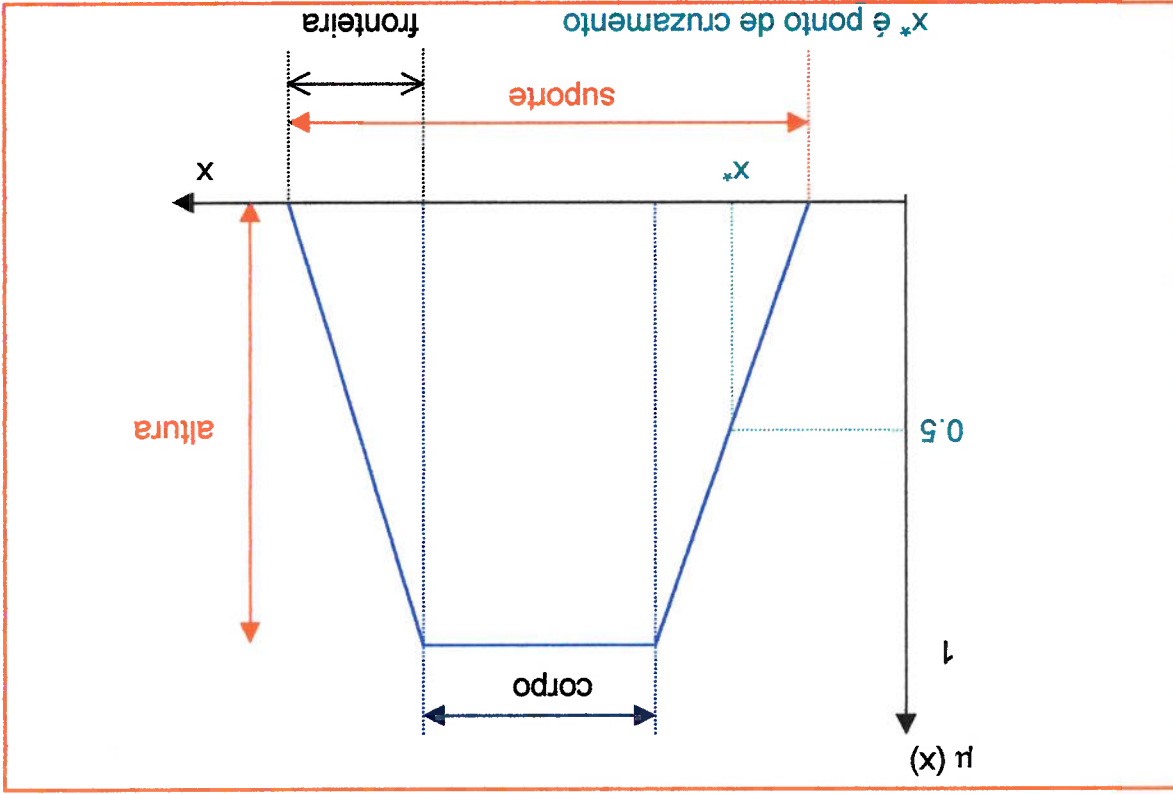


Figura 4.3 - Ilustração do Suporte, Fronteiras, Corpo e Altura de um Conjunto Fuzzy

- O *suporte* de um conjunto fuzzy A , denotado por $\text{sup } A$, é o conjunto clássico de todos os elementos de X para os quais $\mu_A(x) > 0$. É dado por:

$$\text{Sup } A = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\}$$

Se o suporte do conjunto fuzzy A é um único ponto $x \in X$, no qual $\mu_A(x)=1$, o conjunto A é chamado de "fuzzy singleton".

- Um *ponto de cruzamento* ("crossover point") de A é um elemento $x \in X$, cujo grau de pertinência é 0.5. Ou seja $\mu_A(x) = 0.5$.

- A *altura* de um conjunto fuzzy A, ("height"), denotada por $\text{Alt}(A)$, é definida como o valor mínimo dos limitantes superiores:

$$\text{Alt}(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \quad (4.11)$$

Quando $\text{Alt}(A) = 1$, o conjunto fuzzy A é dito normal e quando $\text{Alt}(A) < 1$, é chamado de sub-normal.

- O *corpo* ("kernel") de um conjunto fuzzy A, denotado por $\text{cor}(A)$, é um subconjunto não fuzzy de X tal que:

$$\text{cor}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (4.12)$$

Ou seja, é a região onde a função pertinência tem valor 1.

- As *fronteiras* de um conjunto fuzzy A são as regiões laterais da função de pertinência, onde a função pertinência tem valor maior que zero e menor que um.

- O α -cut de um conjunto fuzzy A é definido como:

$$\alpha\text{-cut}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > \alpha\} \quad (4.13)$$

O α -cut é utilizado quando se deseja exibir um elemento $x \in X$, que pertence a um conjunto fuzzy com um grau de pertinência maior que um limiar α .

O princípio da extensão é uma ferramenta utilizada para estender conceitos da teoria de conjuntos clássica para a teoria de conjuntos fuzzy.

4.3.4 Princípio da extensão

para $\forall x_1, x_2 \in X \text{ e } \forall \lambda \in [0, 1]$ e sendo que "E" indica existe e é único.

$$\mu_F(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_F(x_1), \mu_F(x_2)) \text{ condição de convexidade}$$

$$\exists x_0 \in R, \mu_A(x_0) = 1 \text{ condição de normalidade,}$$

especial em X , o qual é normal e convexo, isto é:

Um número fuzzy F no universo de discurso contínuo $X=R$, é um conjunto fuzzy

4.3.3 Número fuzzy

sendo ainda que $A_j \neq \emptyset$ e $A_j \neq X$, para $j=1, 2, \dots, M$.

$$\forall x \in X, \sum_{j=1}^M \mu_{A_j}(x) = 1 \quad (4.15)$$

como uma partição fuzzy quando:

Dados M conjuntos fuzzy A_j , subconjuntos do universo X , são denominados

compõem o universo de discurso.

• Uma *partição* fuzzy determina o número de termos lingüísticos que

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$$

então

$$\forall x_1, x_2 \in X, \forall \lambda \in [0, 1],$$

• Conjunto fuzzy A é convexo se e somente se:

Definição: sejam X e Y dois conjuntos universo de discurso e f uma função de X em Y . Para um conjunto fuzzy A em X , $A \subset X$, o princípio da extensão define um conjunto B em Y , $B \subset Y$ como:

$$\mu_B(y) = \sup_{x \in f^{-1}(y)} [\mu_A(x)] \tag{4.16}$$

Isto é, $\mu_B(y)$ é o valor supremo de $\mu_A(x)$ para todo $x \in X$ tal que $f(x)=y$, onde $y \in Y$. Assume-se que $f^{-1}(y) \neq \emptyset$. No caso de $f^{-1}(y) = \emptyset$, para algum $y \in Y$, então define-se $\mu_B(y)=0$.

Em termos mais simples, o princípio da extensão permite realizar um mapeamento f de pontos de X para subconjuntos fuzzy de X :

$$f(A) = f(\mu_1/x_1 + \dots + \mu_n/x_n) = \mu_1/f(x_1) + \dots + \mu_n/f(x_n) \tag{4.17}$$

4.3.5 Operações em conjuntos fuzzy

As operações definidas para conjuntos fuzzy são similares às definidas para conjuntos clássicos. Sejam A e B dois conjuntos fuzzy no conjunto universo de discurso X , com as funções pertinências μ_A e μ_B respectivamente. As operações de união, interseção, complementar, produto e produto cartesiano são definidas em termos de suas respectivas funções pertinência.

- A *interseção* de A e B , denotada por $A \cap B$, é um conjunto fuzzy em X , com a função pertinência definida para todo $x \in X$ como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \tag{4.18}$$

- A *união* de A e B, denotada por $A \cup B$, é um conjunto fuzzy de X, com a função pertinência definida para todo $x \in X$ como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.19)$$

- O *complementar* \bar{A} de A é um conjunto fuzzy em X, com a função pertinência definida para todo $x \in X$ como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.20)$$

- O produto de A e B, denotado por $A \cdot B$, é definido como:

$$A \cdot B = \int_X (\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)) / x \quad (4.21)$$

Considerando a operação produto é possível derivar outras operações:

$$A^\alpha = \int_X (\mu_A(x))^\alpha / x \quad (4.22)$$

onde α é um número qualquer positivo, e

$$\alpha A = \int_X \alpha \mu_A(x) / x \quad (4.23)$$

sendo α um número qualquer não-negativo.

Como caso particular das duas definições acima, segue:

- Operação de *contração*:

$$\text{Conc}(A) = A^2 \quad (4.24)$$

- Operação de *dilatação*:

$$\text{Dil}(A) = A^{0.5} \quad (4.25)$$

- Sejam os conjuntos X e Y , universos de discurso. Uma *relação fuzzy* R , denotado por R , de um conjunto X para um conjunto Y é um conjunto fuzzy definido no espaço produto $X \times Y$, onde $X \times Y$ é formado pela coleção de pares ordenados (x,y) tal que $x \in X$ e $y \in Y$. A relação R é caracterizada por

4.3.6 Relação fuzzy e suas composições

- > $x \vee y = \max\{x, y\}$; interseção,
- > $x \cdot y = xy$; produto algébrico,
- > $x \otimes y = \max\{0, x+y-1\}$ produto limitado,
- > x se $y=1$, ou y se $x=1$,
- > 0 se $x, y < 1$, para $x, y \in [0,1]$.

limitado. As operações são definidas como:

- A *Norma Triangular*, é uma função definida de $[0,1] \times [0,1]$ em $[0,1]$. A norma triangular ou norma T , é uma ferramenta que pode ser utilizada para realizar várias operações fuzzy, como interseção, produto algébrico, produto

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \mu_{A_2}(x_2) \dots \mu_{A_n}(x_n)$$

ou

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\}$$

$X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, cuja função pertinência é definida como:

- Se A_1, A_2, \dots, A_n são conjuntos fuzzy em X_1, X_2, \dots, X_n respectivamente, o *produto cartesiano* de A_1, A_2, \dots, A_n é um conjunto fuzzy no espaço produto

Uma *variável linguística* é caracterizada pela quintupla $(X, T(x), X, G, M)$, na qual x é o nome da variável física; $T(x)$ é o conjunto dos termos ou rótulos de x ; X é o universo de discurso, G é o conjunto de regras gramaticais para gerar as

artificial. A *variável linguística* pode ser definida como uma variável que assume valores em um conjunto fuzzy e cujo rótulo é uma sentença em linguagem natural ou

4.3.7 Variáveis linguísticas

da norma T . onde $x \in X$, $y \in Y$ e $z \in Z$ e o símbolo $*$ pode ser qualquer operador na classe

$$\mu_{ROS}(x, z) = \sup_{y \in Y} [\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)], \quad (4.29)$$

Em termos de função pertinência é definida como:

$$ROS = \int_{xz} \max(\mu_R(x, y) \min \mu_S(y, z)) / (x, z) \quad (4.28)$$

definida por:

- Seja R uma relação fuzzy de $X \times Y$ e S uma relação fuzzy de $Y \times Z$. Uma *composição* de R e S é ainda uma relação fuzzy denotada por ROS e

$$R = \int_{xy} \mu_R(x, y) / (x, y) \quad (4.27)$$

como:

uma função pertinência bivariente $\mu_R(x, y)$, onde $x \in X$ e $y \in Y$ é expressa

expressões lógicas a partir dos termos primários; e M são as regras semânticas para associar o significado à cada termo.

Os valores de uma variável lógica x são a concatenação de termos atômicos x_1, x_2, \dots, x_n , ou seja $x = x_1x_2x_3\dots x_n$. Os termos atômicos dividem-se em quatro categorias:

- *termos primários*, como novo, velho, etc.
- a negação, *NOT* e os conectivos, *AND* e *OR*.
- *modificadores* ("hedges"), como: muito, pouco, mais ou menos, etc.
- *delimitadores*, como parênteses.

De uma maneira mais intuitiva, se uma variável pode ser rotulada por seus termos primários, como por exemplo, pequeno, médio e grande, então essa variável é uma variável lógica. Esses rótulos são as denominações dadas aos conjuntos fuzzy. Assim, uma variável lógica pode assumir tanto rótulos, como valores numéricos. Por exemplo, a variável *velocidade* pode assumir os valores de "lento", "médio" e "rápido", assim como qualquer valor numérico real definido no intervalo de $[0, V_{max}]$, onde V_{max} é a máxima velocidade permitida.

4.4 Lógica e Raciocínio Fuzzy

Como a teoria de conjuntos tradicional serve de base para a conceitualização da lógica clássica, a teoria de conjuntos fuzzy, desenvolvida no item 4.3, serve como base para o desenvolvimento de lógica fuzzy. A seguir, são

desenvolvidos alguns conceitos básicos de lógica fuzzy, como proposições e

implicações e regras fuzzy.

4.4.1 Proposições fuzzy

Uma *proposição* fuzzy é uma declaração do tipo "x é grande", onde grande é um rótulo linguístico, definido por um conjunto fuzzy no universo de discurso da variável x. A função das proposições fuzzy é realizar a associação das variáveis aos rótulos linguísticos, os quais são representados por conjuntos fuzzy.

As proposições fuzzy são a base para o desenvolvimento da lógica e raciocínio fuzzy. As proposições fuzzy podem ser combinadas por meio de conectivos fuzzy como "e" (and) e "ou" (or). Esses conectivos são implementados pela norma T e co-norma T, respectivamente.

Os modificadores linguísticos podem ser usados nas proposições para alterar o significado de um rótulo linguístico. Por exemplo o modificador "muito" pode ser utilizado para alterar a proposição "x é grande" para "x é muito grande".

A negação de uma proposição é realizada utilizando o complementar do conjunto fuzzy. Um exemplo bastante simples de negação de uma proposição fuzzy é:

"x não é grande",

que, usando a relação padrão de complementar: $c(a)=1-a$, implica :

$$\mu_{\text{não grande}}(x) = 1 - \mu_{\text{grande}}(x) \quad (4.30)$$

De forma geral, a negação em uma proposição fuzzy pode ser expressa como "x não está em A", o que resulta em:

$$\text{not}(A) = \int_x^x c(\mu_A(x)) / x \quad (4.31)$$

Apesar de existirem algumas possibilidades para a implementação do complementar c, a forma geral mais adotada é:

$$c(\mu_A(x)) = \mu_{\text{not}(A)}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.32)$$

4.4.2 Regras fuzzy

As regras fuzzy são utilizadas para implementar o raciocínio em lógica fuzzy e são representadas por uma função implicação. A implicação fuzzy tem a mesma função, em uma tabela de valores verdade, que uma implicação clássica em lógica clássica.

Em lógica clássica, uma implicação é denotada por: $A \rightarrow B$, pode ser vista como uma representação da declaração:

"Se A então B" (if A then B)

Esse tipo de declaração é chamado de declaração fuzzy tipo "if-else" ou simplesmente regra fuzzy.

- *Representação de uma regra fuzzy*

Uma regra fuzzy é uma declaração fuzzy tipo "if-else" onde a premissa e o consequente consistem de proposições fuzzy. A premissa pode conter uma composição de proposições fuzzy interligadas através dos conectivos lógicos "and" e "or". Por exemplo:

If x_1 é A_1 and x_2 é A_2 then y é B ,

onde os conjuntos fuzzy A_1 , A_2 e B são identificados pelas respectivas funções pertinência μ_{A_1} , μ_{A_2} e μ_B .

4.4.3 Implicações fuzzy

Sejam A e B conjuntos fuzzy definidos em X e Y respectivamente. Uma *implicação fuzzy*, denotada por $A \rightarrow B$, é um tipo especial de relação em $X \times Y$ com as seguintes funções pertinência:

- A função pertinência para *conjunção fuzzy*, $A \rightarrow B = A \times B$, definida para

todo $x \in X$ e $y \in Y$, é dada por:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (4.33)$$

- A função pertinência para a *disjunção fuzzy*, $A \rightarrow B = A \times B$, é definida para

todo $x \in X$ e $y \in Y$, é dada por:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \dot{+} \mu_B(y) \quad (4.34)$$

4.4.4 Modus ponens generalizado e modus tollens generalizado

Em raciocínio fuzzy, existem duas regras de inferência muito importantes:

i. O *Modus Ponens Generalizado* é definido pelo seguinte procedimento de

inferência:

Premissa 1: $x \in \underline{A}$

Premissa 2: if $x \in A$, then $y \in B$

consequente: $y \in \underline{B}$

onde \underline{A} , A , B e \underline{B} são conjuntos fuzzy e x e y variáveis linguísticas.

ii. O *Modus Tollens Generalizado* é definido da seguinte maneira:

Premissa 1: $y \in \underline{B}$

Premissa 2: if $x \in A$, then $y \in B$

Consequente: $x \in \underline{A}$

onde \underline{A} , A , B e \underline{B} são conjuntos fuzzy e x e y variáveis linguísticas.

• A função pertinência para a *implicação material*, é definida como

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_{\bar{A}}(x) + \mu_B(y) \quad (4.35)$$

• A função pertinência para o *cálculo proposicional*, é dada por

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_{\bar{A}}(x) + \mu_{A * B}(y) \quad (4.36)$$

5. SISTEMAS BASEADOS EM LÓGICA FUZZY

Denominam-se *sistemas especialistas fuzzy* ou *sistemas baseados em lógica fuzzy* quaisquer tipos de sistemas que tenham relação direta com conceitos fuzzy como teoria de conjuntos, variáveis linguísticas e lógica fuzzy.

Os sistemas especialistas fuzzy têm por objetivo fornecer um conselho, enquanto o sistema especialista de controle fuzzy deve inferir um valor real, o qual é utilizado como função de controle no processo.

Segundo WANG (1994), os sistemas especialistas fuzzy, ou sistemas de inferência fuzzy, como também são chamados, podem ser classificados de uma maneira geral, em três tipos:

- *sistemas baseados em lógica fuzzy puros,*
- *sistemas fuzzy de Takagi e Sugeno,*
- *sistemas fuzzy com fuzzyficador e defuzzyficador¹.*

5.1 Sistemas Fuzzy Puros

O sistema fuzzy puro, configurado conforme mostra a figura 5.1, é formado basicamente por dois sub-sistemas: a base de regras fuzzy ou base de conhecimento, que consiste em um conjunto de regras tipo "if-else", e o módulo

¹ Os termos fuzzyficador e defuzzyficador são utilizados como "tradução" para fuzzyfier e defuzzyfier respectivamente.

de inferência, que utiliza o conjunto de regras para determinar um mapeamento de conjuntos fuzzy do universo de discurso de entradas $X \subset R^n$, para o universo de discurso das saídas $Y \subset R^n$, baseado em princípios de lógica fuzzy.

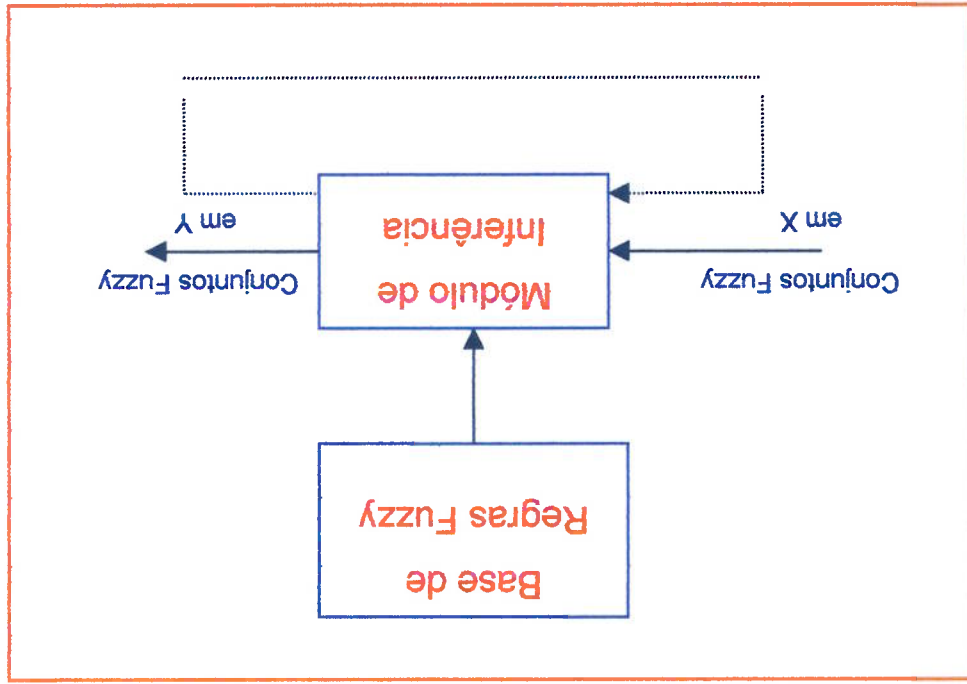


Figura 5.1 - Configuração de um Sistema Fuzzy Puro

Se o sistema for realimentado, conforme indica a linha pontilhada da Figura 5.1, então ele passa a ser um sistema dinâmico fuzzy, no qual as entradas dependem da saída.

5.1.1 Base de conhecimento ou base de regras fuzzy

A base de conhecimento ou base de regras pode ser considerada como o coração do sistema fuzzy, no sentido que todos os outros componentes são usados para interpretá-la na busca da solução do problema. Esta base de

regras deve compreender todo o domínio da aplicação específica, assim como atender aos objetivos do controle.

A base de conhecimento consiste de uma base de dados e de uma base de regras linguísticas de controle, que devem satisfazer às seguintes funções:

- i. a base de dados deve fornecer as definições necessárias para configurar as regras e para manipular os dados fuzzy no controlador.
- ii. a base de regras deve caracterizar os objetivos de controle e a política de controle, que são de domínio do especialista do assunto, através de um conjunto de regras linguísticas de controle.

Uma base de regras fuzzy é uma coleção de regras tipo "if-else". As regras fuzzy podem ser consideradas como um conjunto de M regras paralelas, que têm uma premissa baseada em n variáveis, na forma:

$$R^{(k)} : \text{if } x_1 \text{ é } F_1^{(k)} \text{ e } x_2 \text{ é } F_2^{(k)} \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } F_n^{(k)} \text{ então } y^{(k)} \text{ é } G^{(k)} \quad (5.1)$$

onde $F_i(k)$ e $G(k)$ são conjuntos fuzzy em X_i e Y , respectivamente, para $k = 1, 2, \dots, M$, $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ são as variáveis linguísticas de entrada de entrada e $y \in Y$ é a variável linguística de saída, para um sistema que é multi-entradas e de uma única saída.

A incorporação do conhecimento humano ao sistema especialista é realizada através de regras tipo "if-else". Cada regra "if-else" define um conjunto fuzzy, $F_1^k \times F_2^k \times \dots \times F_n^k \rightarrow G$, no espaço produto $X \times Y$, através do processo de inferência.

Segundo JAGER (1995), as regras if-else, conforme definidas acima, têm mostrado ser uma forma bastante eficiente de representação do conhecimento e do raciocínio humano.

Para que a base de regras fuzzy seja de fato eficiente, ela deve satisfazer às

seguintes propriedades:

- continuidade,
- consistência,
- integridade.

- A *continuidade* de uma regra fuzzy requer que as regras com premissas adjacentes tenham consequentes adjacentes. Para exemplificar a noção de conjuntos fuzzy adjacentes, considera-se o seguinte conjunto ordenado de conjuntos fuzzy:

$$F_1 < F_2 < \dots < F_{i-1} < F_i < F_{i+1} < \dots$$

onde F_{i-1} e F_i são adjacentes, assim como F_i e F_{i+1} . Para fortalecer a condição de continuidade, assume-se que o conjunto fuzzy adjacente também sobrepoõe-se ao seu vizinho.

As premissas das regras são consideradas adjacentes quando elas contêm as mesmas condições (ou conjuntos fuzzy), com exceção de uma.

- A *consistência* da base de regras é dada pela consistência na forma de representar o conhecimento. Um tipo de inconsistência ocorre quando

existem em uma mesma base, duas regras com a mesma premissa e

diferentes conclusões. Por exemplo, nas regras de controle de um robô,

as seguintes regras fuzzy tornam a base de regras inconsistente.

If o obstáculo está em frente then vire para a direita,

If o obstáculo está em frente then vire para a esquerda.

- A *integridade* de uma base de regras fuzzy é utilizada como uma medida

para garantir que o conhecimento representado pela base de regras está

completo. Por exemplo, esta propriedade não é satisfeita quando, para

determinados estados no espaço das entradas, não está definida nenhuma

ação de saída. A forma como os conjuntos fuzzy são usados para definir as

premissas é essencial para garantir a integridade da base de regras. Uma

medida para a integridade da base de regras fuzzy pode ser dada por:

$$CM(x) = \sum_{M_i} \prod_{N_i} \mu_{F_i(x)}$$

(5.2)

onde: x é o vetor de dados numéricos, M_i é o número de regras fuzzy e N é

o número de conjuntos fuzzy.

Considerando a expressão (5.2), é possível resumir as seguintes condições

sobre a integridade da base de regras fuzzy:

$CM(x) = 0$ → a base de regras está incompleta,

$0 < CM(x) < 1$ → a base de regras está sub-completa,

$CM(x) = 1$ → a base de regras está estritamente completa,

$CM(x) > 1$ → a base de regras está redundantemente

completa.

O sistema fuzzy puro contém a essência dos sistemas especialistas fuzzy, que é uma formulação geral na qual a informação linguística de uma experiência humana é quantificada e, utilizando-se princípios de lógica fuzzy, essa informação é tratada e passa a ser usada de forma sistemática. A única desvantagem desse método é que as entradas e a saída são conjuntos fuzzy, o que dificulta sua aplicabilidade para a maioria dos sistemas de engenharia, nos quais as entradas e as saídas são variáveis que assumem valores reais. Para contornar esse problema de aplicabilidade, TAKAGI e SUGENO (1985) sugeriram um outro tipo de sistema que é descrito a seguir.

5.2 Sistemas Fuzzy de Takagi e Sugeno

Neste tipo de sistema fuzzy, as entradas e saídas são variáveis reais, e em lugar de considerar as regras fuzzy tipo "if-else" como utilizadas nos sistemas puros, TAKAGI, SUGENO (1985) propuseram o seguinte tipo de regra:

$$R^{(k)}: \text{if } x_1 \text{ é } F_1^{(k)} \text{ e } x_2 \text{ é } F_2^{(k)} \text{ e } \dots \text{ e } x_n \text{ é } F_n^{(k)} \text{ então } y^{(k)} = c_0^{(k)} + c_1^{(k)}x_1 + \dots + c_n^{(k)}x_n, \quad (5.3)$$

onde: $F_i^{(k)}$ são conjuntos fuzzy,

$c_i^{(k)}$ são parâmetros reais,

$y^{(k)}$ é a saída do sistema para a regra k , para $k=1, 2, 3, \dots, M$.

Neste tipo de sistema, o antecedente é uma variável fuzzy e o consequente é uma variável não-fuzzy, que é definida como uma combinação das variáveis de entrada. Para um vetor de entrada real $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in X$, a saída $y(\underline{x})$ do

sistema fuzzy de Takagi e Sugeno é definida como uma média ponderada das

saídas $y^{(k)}$:

$$y(x) = \frac{\sum_{k=1}^M w_k y_k}{\sum_{k=1}^M w_k} \quad (5.4)$$

onde $w^{(k)}$ significa o valor verdade total das premissas da regra $R^{(k)}$ e é

calculado como:

$$w^{(k)} = \prod_{i=1}^n \mu_{f_i^k}(x_i) \quad (5.5)$$

A configuração do sistema de Takagi e Sugeno é mostrada na Figura 5.2.

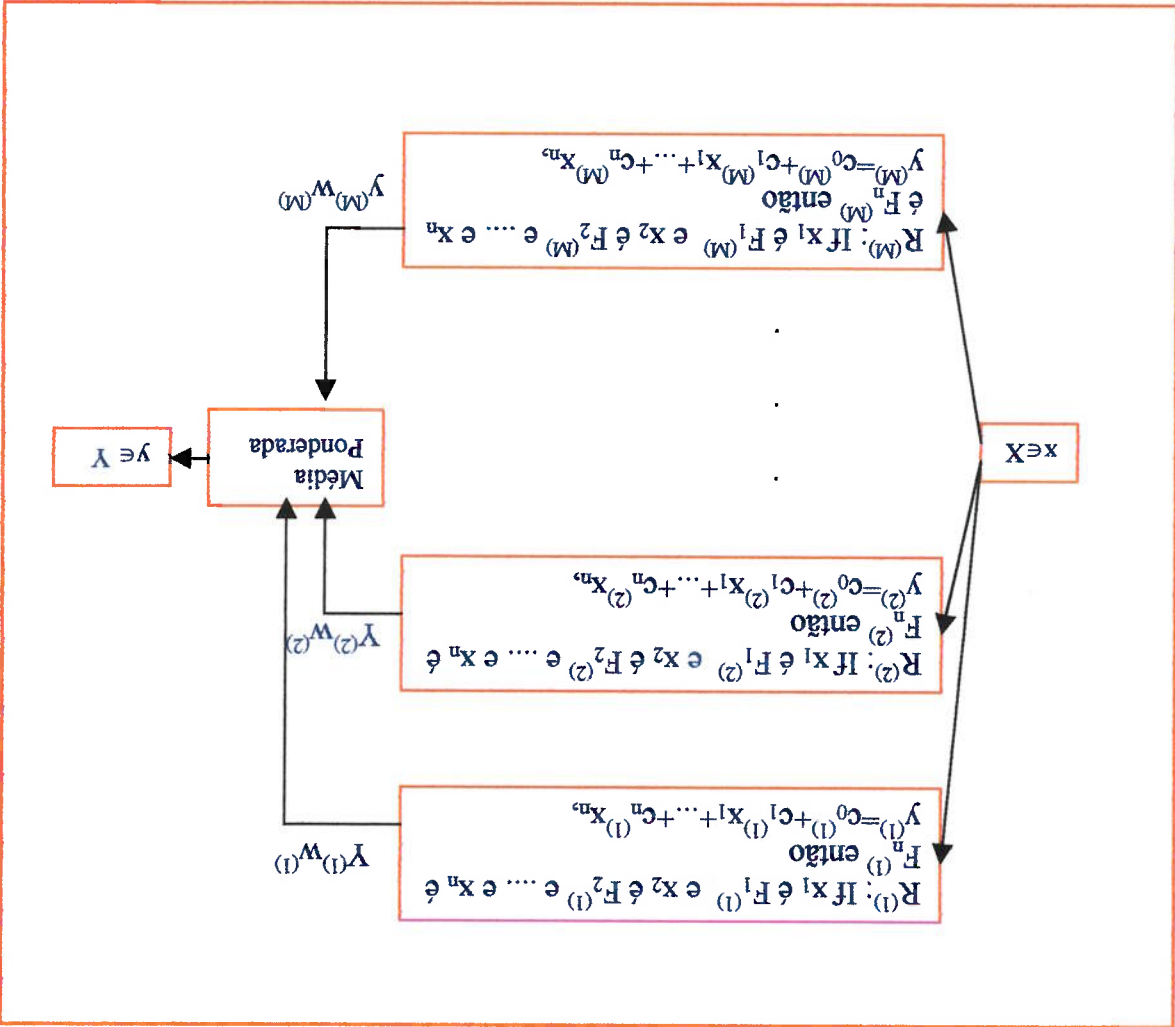
Este tipo de sistema tem sido amplamente utilizado, apesar de haver problemas como dificuldades para a estimação dos parâmetros $c_i^{(k)}$ e, ausência de uma estrutura natural para a incorporação das experiências humanas através de regras. O terceiro tipo de sistema fuzzy, a ser mostrado a seguir, diminui essas dificuldades.

Este tipo de sistema foi proposto primeiramente por MANDANI (1974) para controlar plantas de sistemas dinâmicos. É conhecido na literatura como

Um sistema especialista fuzzy com fuzzyficador e defuzzyficador nada mais é do que o sistema especialista fuzzy puro com a adição de dois elementos de interface: fuzzyficador e defuzzyficador, Figura 5.3.

5.3 Sistemas Fuzzy com Fuzzyficador e Defuzzyficador

Figura 5.2 - Configuração do Sistema Fuzzy de Tagaki e Sugeno



sistema fuzzy de Mandani e tem sido utilizado, com sucesso, em muitos tipos de controle de processos industriais.

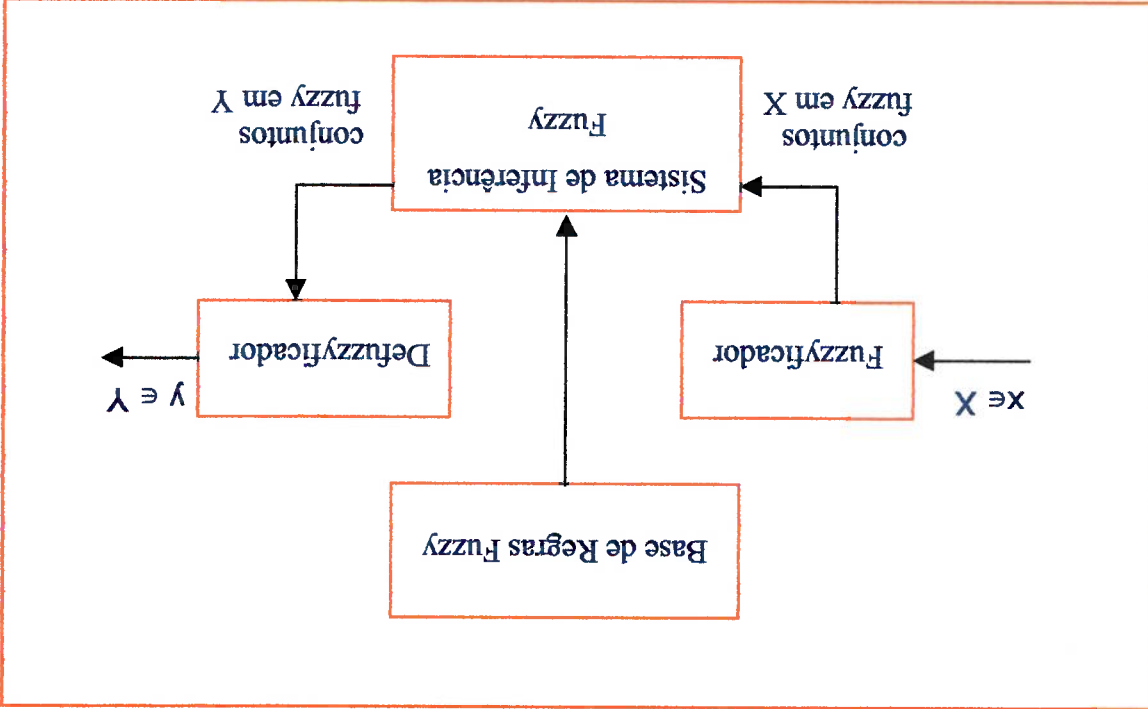


Figura 5.3 - Configuração Básica de Sistemas Fuzzy com Fuzzificador e Defuzzificador

A interface de fuzzyificação mapeia as variáveis reais (entradas) de X , em conjuntos fuzzy em X e a interface de defuzzyificação mapeia conjuntos fuzzy de Y em variáveis reais (saídas) de Y . A base de regras (conhecimento) e o sistema de inferência permanecem os mesmos, conforme definidos para os sistemas fuzzy puros.

5.3.1 Interface de fuzzyificação

Todo o processo de fuzzyificação está relacionado com a imprecisão, pois é uma aplicação que transforma uma medida real em um valor subjetivo. Pode

ser definido como um mapeamento de observações realizadas no espaço das entradas em conjuntos fuzzy contidos no universo de discurso das entradas.

A interface de fuzzyficação tem as seguintes funcionalidades:

- i. medir, no sentido de quantificar, os valores das variáveis de entrada;
- ii. realizar um mapeamento (em escala) de forma a transferir a faixa de valores das variáveis de entrada para valores correspondentes no universo de discurso;
- iii. realizar a função de fuzzyficação, convertendo dados de entrada em valores linguísticos adequados, os quais podem ser vistos como rótulos de conjuntos fuzzy.

O fuzzyficator ou operador de fuzzyficação realiza um mapeamento de um ponto $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in X$ para um conjunto fuzzy A em X. Existem pelo menos duas maneiras de realizar esse mapeamento:

- a) *Fuzzyficator singleton*: quando A é um conjunto fuzzy tipo singleton com suporte \underline{x} , isto é, $\mu_A(\underline{x}) = 1$ para $\underline{x} = \underline{x}$ e $\mu_A(\underline{x}') = 0$ para todo $\underline{x}' \neq \underline{x}$.

- b) *Fuzzyficator não-singleton*: $\mu_A(\underline{x}) = 1$ e $\mu_A(\underline{x}')$ decresce de 1 da mesma

maneira que \underline{x}' se afasta de \underline{x} . Por exemplo $\mu_A(\underline{x}') = \exp\left[-\frac{(\underline{x}' - \underline{x})^T (\underline{x}' - \underline{x})}{\sigma^2}\right]$,

onde σ^2 é um parâmetro que caracteriza a forma de $\mu_A(\underline{x})$. Este tipo de fuzzyficator é indicado para os casos em que as entradas estão corrompidas por algum tipo de ruído.

- **Critério da Média dos Máximos**

ação de controle atinge seu valor máximo.

O critério do máximo produz o ponto no qual a distribuição de possibilidades da

- **Critério do Máximo**

média dos máximos e critério do centro das áreas.

sugeriu algumas estratégias descritas como: critério do máximo, critério da

processo de defuzzificação. ZADEH (1973) evidenciou esse problema e

Infelizmente, não existe um procedimento único e eficiente para realizar o

fuzzy.

fuzzy resultante do processo de inferência, em uma ação de controle não-

b) realizar o processo de defuzzificação, que transforma uma ação de controle

discurso;

valores das variáveis de saída em valores correspondentes no universo de

a) realizar um mapeamento (em escala), de forma a converter a faixa de

A interface de defuzzificação tem as seguintes funcionalidades:

de controle fuzzy.

valor real (não-fuzzy), e, consequentemente, é necessário defuzzificar a ação

processo de controle "on-line", a ação de controle deve ser fornecida em um

distribuição de possibilidades da ação de controle inferida. Porém, em um

A saída do módulo de inferência é ainda um conjunto fuzzy, que representa a

5.3.2 Interface de defuzzificação

que torna este tipo de sistema atraente é o fato das variáveis de entrada e saída serem variáveis reais, fornecendo um procedimento natural para a incorporação do conhecimento humano através de regras do tipo "if-else", permitindo, ainda, que o usuário tenha liberdade para escolher a forma de fuzzyficar as variáveis no processo de inferência e a forma de defuzzyficação

onde n é o número de níveis de quantificação da saída.

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu^z(w_j)}{\sum_{j=1}^n \mu^z(w_j) \cdot w_j} \quad (5.7)$$

discreto, este método calcula a ação de controle por:

O método do centro das áreas é o mais usado e gera o centro de gravidade da distribuição de possibilidades da ação de controle. No caso do universo

• **Método do Centro das Áreas**

onde w_j é o valor suporte no qual a função pertinência atinge o valor máximo $\mu^z(w_j)$, e k é o número de valores de suporte.

$$z_0 = \sum_{j=1}^k \frac{w_j}{k} \quad (5.6)$$

discreto, a ação de controle pode ser expressa como:

O critério da média dos máximos gera uma ação de controle que representa o valor médio de todas as ações de controle locais, cuja função pertinência alcança o valor máximo. Mais especificamente, no caso de um universo

final, possibilitando, assim, que o sistema fuzzy construído seja totalmente adequado ao problema de controle proposto.

5.4 Sistema Fuzzy com Controlador

O sistema fuzzy com controlador, ilustrado pela Figura 5.4, é um tipo de sistema que utiliza todas as ferramentas relacionadas com lógica fuzzy para tomar uma decisão, a qual implica em uma ação de controle.

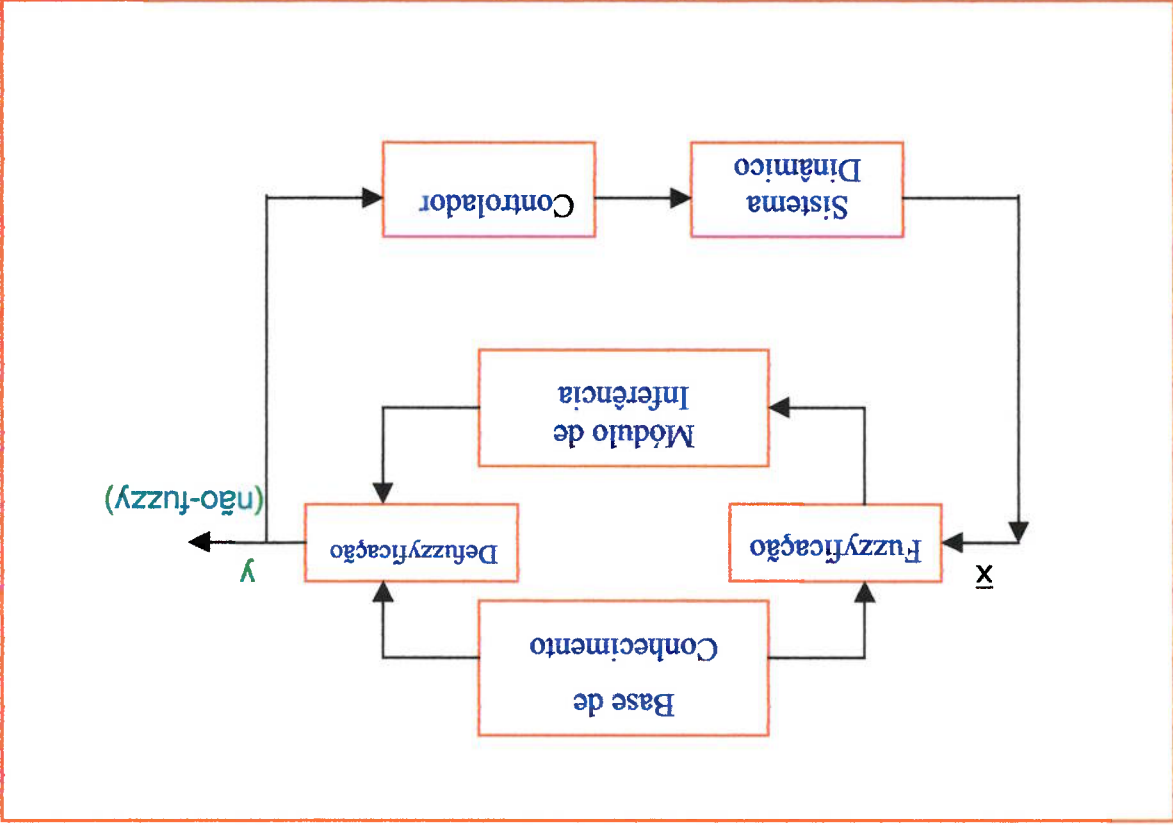


Figura 5.4 - Sistema Especialista Fuzzy com Controlador

Na Figura 5.4 os módulos da base de conhecimento e de inferência podem ser fundidos em um único bloco, denominado de base de regras fuzzy, o qual incorpora o conhecimento do especialista, expressando-o através de regras tipo "if-else", para que o módulo de inferência possa selecionar a ação de

controle. O conhecimento do especialista também é expresso no processo de

fuzzificação e defuzzificação.

A coleção de regras de controle fuzzy, que são expressas na forma de declarações condicionais, formam a base de regras do controlador lógico fuzzy.

Para configurar um controlador lógico fuzzy é necessário examinar os seguintes tópicos relacionados com as regras de controle:

- i. escolha das variáveis de entrada (para o controlador),
- ii. escolha das variáveis de saída (variáveis de controle),
- iii. formas de obtenção das regras de controle fuzzy.

5.4.1 Escolha das variáveis de estado e variáveis de saída do processo

As regras de controle obtidas através do conhecimento de um operador experiente são formulações linguísticas, diferentemente da abordagem estritamente numérica dos projetos de sistemas de controle convencionais.

Escolhas apropriadas das variáveis de estado do processo a ser controlado, assim como das variáveis de controle, constituem a parte mais importante para a caracterização do sistema fuzzy.

A seleção das variáveis linguísticas tem grande importância na estrutura do controlador. É através da escolha das variáveis linguísticas e respectivas

funções pertinentes que o especialista pode expressar o conhecimento e a experiência sobre o processo a ser controlado.

5.4.2 Obtenção das regras de controle

Existem pelo menos quatro métodos básicos para a derivação das regras de controle fuzzy, segundo Takagi e Sugeno em LEE (1990). Os métodos aqui apresentados não são mutuamente exclusivos e algumas vezes, a combinação deles é necessária para a construção de um novo método eficiente para a obtenção das regras de controle fuzzy. São eles:

a) Experiência do especialista e conhecimento de engenharia de controle

Verifica-se que os controladores fuzzy foram as primeiras aplicações práticas de sistemas especialistas e esse fato ocorreu devido à formatação da implicação fuzzy, que permitiu que a experiência do especialista, sua forma de pensar e agir pudesse ser descrita através de linguagem. A maioria dos controladores fuzzy projetados têm como referência a experiência humana do operador aliada ao conhecimento de engenharia de controle. As regras de controle fuzzy têm a forma de declarações condicionais, nas quais as variáveis de estado no termo *antecedente* estão relacionadas com as variáveis de controle do processo no termo *consequente*.

Um exemplo desse tipo de aplicação é a operação manual de um forno de cimento, segundo (UMBERS, KING (1980)), onde o controlador de operação automática foi projetado com base somente na experiência do operador e

Nesse tipo de problema de controle, a habilidade de modelar as ações de comando do operador em termos de implicações fuzzy, usando os dados de entrada-saída relacionados com as ações de comando, resultará na capacidade do controlador fuzzy. É importante observar que, neste caso, o conhecimento da relação entrada-saída não é importante; o que é essencial é a forma como o ser humano, consciente ou inconscientemente, realiza a operação manual. TAKAGI e SUGENO (1983), que estudaram como obter as

os pés, além do cérebro.

de controle. Por exemplo, para dirigir um carro é necessário utilizar as mãos e habilidade (manual) do operador for um fator primordial para o sucesso da ação A modelagem das regras de comando deve ser empregada quando a

b) Modelagem baseada nas ações de comando do operador

um processo de tentativas e erros.

experiência sobre o processo a ser controlado, e, a seguir, testá-las através de relação com um determinado número de protocolos baseado em sua É ainda possível para um engenheiro de controle de processos fazer uma do controlador fuzzy.

possível, através de entrevistas e questionários para a montagem do protótipo vital importância, a extração do conhecimento deve ser a mais completa ser controlado. Nessa abordagem, em que o conhecimento do operador é de do operador foi verbalizada e foi montado um modelo qualitativo do processo a depois foi otimizado através de resultados de testes de campo. A experiência

ações de controle fuzzy, enfatizaram que para automatizar esses tipos de processos é interessante expressar as regras de controle fuzzy do operador como regras tipo "if-else" empregando variáveis linguísticas. Em algumas aplicações reais, é possível combinar os métodos (a) com (b), como ocorreu no processo de purificação de água desenvolvido por YAGISHITA e SUGENO (1984).

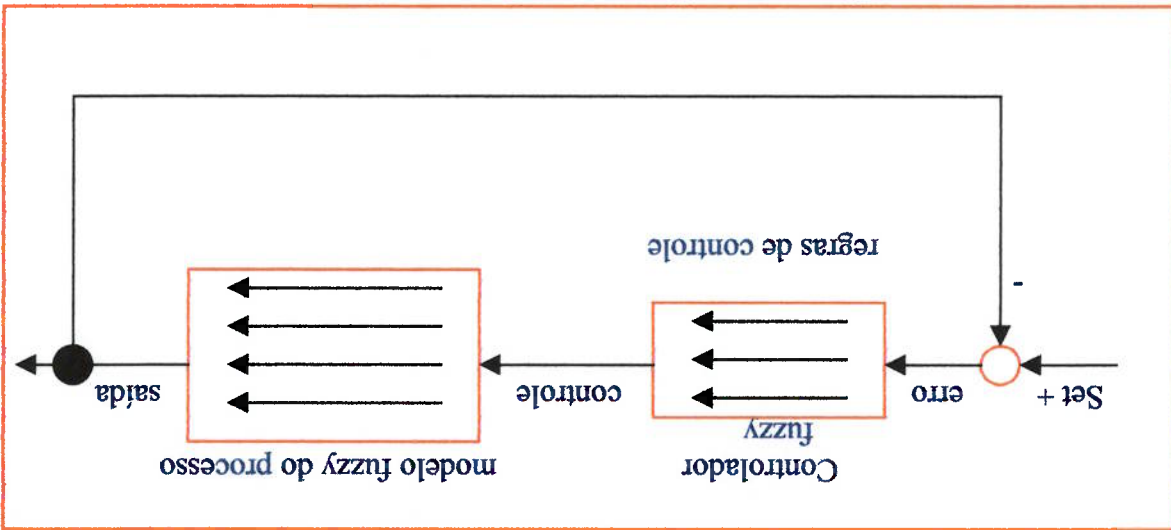
c) Modelagem fuzzy do processo de controle

Neste tipo de processo de controle supõe que o projetista tenha alguma noção, mesmo que imprecisa, das características dinâmicas do processo a ser controlado, para que possa construir um modelo fuzzy do comportamento dinâmico do processo, para trabalhar em conjunto com o controlador, conforme indicado pela Figura 5.5. Baseado no modelo fuzzy do comportamento do processo, é possível gerar um conjunto de regras de controle fuzzy de forma que o sistema dinâmico possa alcançar um bom desempenho.

Na modelagem fuzzy, as características do processo a ser controlado são representadas através de um conjunto de comportamentos fuzzy, os quais são expressos por meio de implicações fuzzy relacionadas com as variáveis de estado, entradas e saídas.

Na Figura 5.5 é exposta uma ideia para um sistema de controle fuzzy, onde o controlador é formado por um conjunto de regras de controle e o modelo do processo consiste de um conjunto de comportamentos do processo.

Figura 5.5 – Sistema de Controle Fuzzy



Existem dois métodos para projetar esse tipo de controle. O primeiro, é baseada em um método heurístico, no qual tenta-se determinar uma regra de controle fuzzy capaz de compensar um comportamento indesejado do processo, levando sempre em conta os objetivos do controle. Neste tipo de abordagem, deve sempre existir uma regra de controle em correspondência à um comportamento do processo. Considerando que alguns comportamentos não precisam ser compensados, o número de regras de controle pode ser reduzido.

O segundo método consiste em determinar a estrutura e os parâmetros para as regras de controle de forma que o sistema com o controlador projetado satisfaça os objetivos de controle, como, por exemplo, minimizar índice de desempenho, resposta dentro de uma faixa desejável, etc.

Do ponto de vista de aplicabilidade, este projeto do controlador apresenta algumas dificuldades, como identificação da estrutura e dos parâmetros para criar as regras de controle a partir dos dados de entrada e saída. Por identificação da estrutura das regras de controle entende-se a determinação das variáveis de entrada que influenciam nas variáveis de saída e por problema de identificação de parâmetros, entende-se a determinação dos coeficientes das equações lineares do termo consequente em uma implicação da forma:

$$\text{If } x_1 \in A_1^i, x_2 \in A_2^i, \dots, x_m \in A_m^i \text{ então } y = p_0^i + p_1^i x_1 + p_2^i x_2 + \dots + p_m^i x_m \quad (5.8)$$

Para $i=1, 2, \dots, n$, representando o número de regras de controle fuzzy

d) Controlador baseado em aprendizado

Muitos controladores fuzzy têm sido construídos com o objetivo de emular o comportamento humano no processo de raciocínio para tomada de decisões, porém muito pouco tem sido realizado na direção do aproveitamento do aprendizado humano, ou seja, da habilidade de criar regras de controle e modificá-las a partir de experiências. PROCYK e MANDAMI (1979) descrevem o primeiro controlador "self-organizing", cuja estrutura hierárquica é constituída por duas bases de regras. A primeira, é a base de regras do controlador fuzzy e a segunda base é construída por meio de metas regras, que representam a habilidade humana para criar e modificar a base geral de regras, utilizando-se de resultados globais do sistema.

Vários estudos têm sido conduzidos nessa área, principalmente no Queen Mary College da University of London, liderados por SUGENO, sendo que o

melhor exemplo de um sistema de controle fuzzy com capacidade de aprender,

ainda é o carro desenvolvido por SUGENO (1985), que pode ser treinado para

estacionar sozinho.

6. DESCRIÇÃO DO CONTROLADOR / CONSELHEIRO FUZZY

Nas últimas duas décadas, com o advento de microcomputadores, a tecnologia de controladores automáticos teve um grande avanço e muitos processos de controle, que até então eram operados manualmente, passaram a ser operados através de controladores eletrônicos.

Comparando o desempenho de um controlador eletrônico convencional com o controlador fuzzy pode ser melhor que o convencional. Na maior parte das vezes, a ação de controle gerada por microcontroladores é rápida e precisa; porém, a qualidade do controle pode ser inferior à qualidade de controle de um exímio operador, pois a percepção humana de todas as variáveis envolvidas no processo dificilmente pode ser representada por uma técnica de controle convencional. É extrema a necessidade de bons modelos para produzir bons controladores.

Uma outra situação, em que o desempenho do controlador fuzzy pode ser melhor que o do controlador convencional, é quando o sistema controlado é um sistema não linear, já que a ação gerada por um controlador é quase sempre calculada para um sistema linearizado. Nos sistemas não-lineares, como é o caso da dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária, em que os parâmetros do sistema variam com o tempo, ou quando existem múltiplos

objetivos de controle, ou ainda quando o modelo do processo não é bem conhecido, o desempenho de um controlador convencional pode ser inferior ao de um controlador lógico fuzzy.

No trabalho proposto, de desenvolvimento de um controlador baseado em lógica fuzzy para auxiliar em operações ferroviárias, é construído um algoritmo de controle no qual a habilidade do operador é inserida através de conjuntos fuzzy e regras de inferência fuzzy, assim como conceitos de operação. A sensibilidade do operador é introduzida no modelo através de um conjunto de índices de desempenho, que são avaliados em cada passo do controle e que devem ser satisfatórios, não individualmente, mas como um conjunto de funções.

O controlador fuzzy seleciona a ação de controle u^* a partir de um conjunto de regras de controle, descritas como "se $x_1 \in A_1$ e $x_2 \in B_1$ e $x_3 \in C_1$ então $u \in U$ ". O controlador avalia o estado do sistema através da premissa da proposição, ou seja "se $x_1 \in A_1$ e $x_2 \in B_1$ e $x_3 \in C_1$ " utilizando os resultados dos vários índices de desempenho, e então, escolhe a ação de controle " $u \in U$ ". A Figura 6.1 ilustra a sequência realizada em cada passo de controle.

O processo para a produção de um controlador fuzzy pode ser definido pelos seguintes passos:

Passo 1: descrever as estratégias de operação utilizadas por operador(es) experiente(s) para controlar o sistema.

Passo 2: definir o significado dos índices de desempenho em termos linguísticos.

Passo 3: definir os conjuntos fuzzy que satisfacem os indices de desempenho.

Passo 4: converter as estratégias de operação, definidas em termos linguísticos, para regras de controle fuzzy.

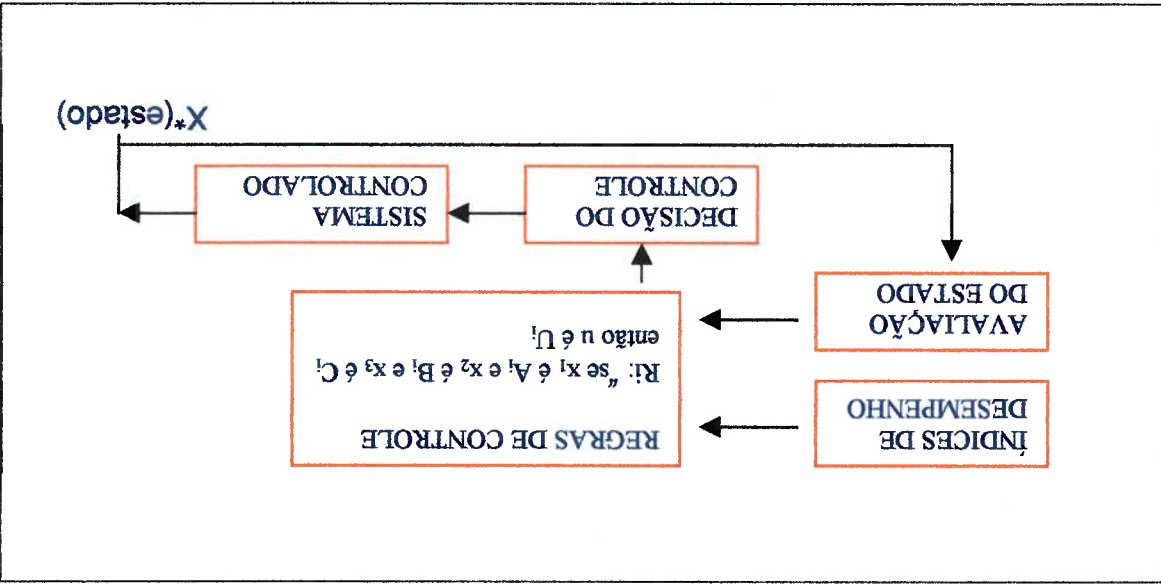


Figura 6.1 – Ilustração da Sequência de Controle

Os principais indices de desempenho avaliados são:

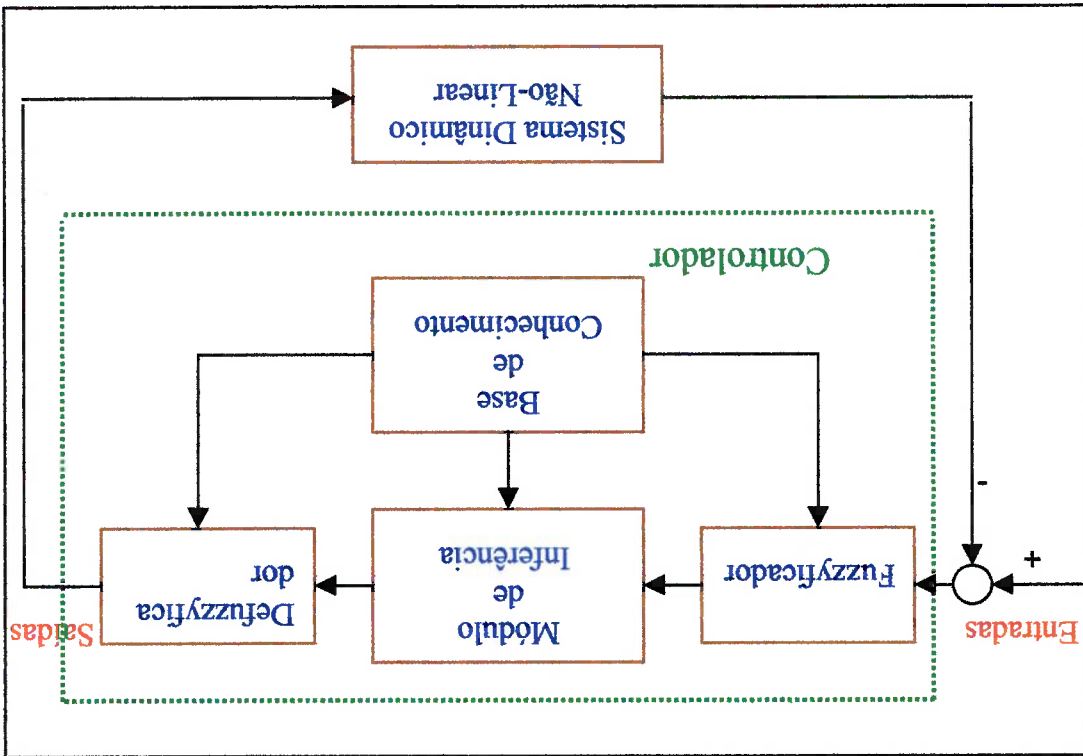
- garantia de segurança na viagem,
- minimização dos esforços longitudinais nos engates,
- otimização da tratabilidade da velocidade ideal,
- otimização de tempo de percurso,
- redução de consumo de combustível.

A seguir, são detalhadas as principais partes que compõem o projeto do controlador fuzzy para operação ferroviária. A configuração geral do controlador projetado é mostrada na Figura 6.2.

Um maquinista experiente, durante todo o tempo em que está operando uma composição ferroviária, utiliza o conhecimento adquirido através de muitos anos de prática, juntamente com os conceitos de operação, para avaliar, a cada instante, os índices de desempenho que indicam a qualidade da operação que está realizando. Para realizar o projeto do controlador fuzzy é necessário escolher um conjunto de variáveis, denominadas de variáveis de entrada do controlador, variáveis de estado do sistema, variáveis de saída do sistema e variáveis externas ao processo.

6.1 Variáveis de Entrada do Controlador Lógico Fuzzy

Figura 6.2 - Arquitetura do Controlador Fuzzy



As variáveis relativas ao sistema dinâmico, que são utilizadas como entrada do

controlador são:

- velocidade instantânea da composição registrada na locomotiva líder, (V) ;

- aceleração longitudinal instantânea medida na locomotiva líder, (Acl) ;
- tempo dispendido desde a última alteração no ponto de tração, (ts) ;
- ou ponto de freio dinâmico, (td) ;

- posicionamento instantâneo de cada veículo da composição na via;
- tempo de viagem (t) .

As variáveis externas ao sistema dinâmico são:

- perfil vertical e raio de curvatura da via, para cada veículo, na posição atual;
- perfil vertical e raio de curvatura da via, para cada veículo, em uma posição futura próxima;
- perfil vertical e raio de curvatura da via, para cada veículo, em uma posição futura distante;
- limite de velocidade para composição em uma posição futura (aproximadamente 1000 m à frente);

- velocidade ideal para cada bloco da via, (V_t) ;

- velocidade limite ou velocidade máxima para cada bloco da via, $(V_{max}=V_t+2V_e)$, onde $\pm V_e$ define a faixa de variação da velocidade permitida em torno da velocidade ideal V_t ;

- tempo ótimo de viagem por bloco de via (t_t) , que é definido como sendo S_B/V_t , onde S_B é o comprimento do bloco .

Para tomar qualquer uma das ações, o operador deve conhecer o estado atual do sistema dinâmico e das variáveis externas, ou seja, se está em processo de tração ou de frenagem, e então, decidir sobre a atitude mais adequada a ser tomada, de acordo com o tipo de procedimento operacional que está sendo realizado, do conhecimento topográfico da via e do sistema de sinalização.

- aumentar a velocidade,
- manter a velocidade,
- reduzir a velocidade.

A variável de saída do controlador fuzzy é única e representa a atitude que o maquinista toma, dependendo das avaliações realizadas nos índices de desempenho do sistema. A atitude a ser tomada pode ser uma das seguintes:

6.2 Variável de Saída do Controlador Lógico Fuzzy

As variáveis perfil vertical e raio de curvatura da via na posição atual, perfil vertical e raio de curvatura da via em uma posição futura próxima e o perfil vertical e raio de curvatura da via em uma posição futura mais distante, representam o conhecimento do maquinista sobre o perfil topográfico da via. A variável limite de velocidade para composição em uma posição futura (aproximadamente 1000 m à frente), é obtida pelo sistema de sinalização implantado na via.

6.3 Fuzzyficação das Variáveis de Entrada

O objetivo do processo de fuzzyficação é realizar um mapeamento das variáveis de entrada em conjuntos fuzzy, cuja função pertinência é um valor real que varia entre 0,0 e 1,0.

As variáveis de entrada do controlador fuzzyficadas são:

- aceleração da locomotiva (acI);
- velocidade atual da composição (v);
- intervalo de tempo despendido desde a última alteração no ponto de tração (ts), ou no ponto de freio dinâmico (td);
- tempo necessário para atingir a posição X_{lim} , a partir da qual o limite de velocidade é inferior ao limite atual de velocidade (tr);
- perfil vertical e raio de curvatura atual da via, considerando a posição da locomotiva líder (ViaR);
- perfil vertical e raio de curvatura da via em um futuro próximo, em relação à posição da locomotiva líder (ViaF).

6.3.1 Fuzzyficação da aceleração longitudinal da locomotiva

A aceleração longitudinal medida na locomotiva é fuzzyfificada conforme ilustra a Figura 6.3.

A variável real aceleração longitudinal pode ser transformada pelo processo de fuzzyficação em uma variável linguística, que é formada pelos seguintes rótulos linguísticos: grande negativa, pequena negativa, zero, pequena positiva e grande positiva. A cada rótulo linguístico, corresponde um conjunto fuzzy, descrito por uma função pertinência, e a cada conjunto fuzzy está associado um peso, conforme Tabela 6.1.

Através de experiência pessoal, analisando resultados de vários tipos de simulações de operação ferroviária e testes de campo, foi possível observar, por meio da distribuição de probabilidade da variável real aceleração longitudinal, que 99 % dos valores registrados estão na faixa de $-0,1 \text{ m/s}^2$ a $0,1 \text{ m/s}^2$.

Figura 6.3 - Fuzzyficação da Variável Aceleração Longitudinal da Locomotiva

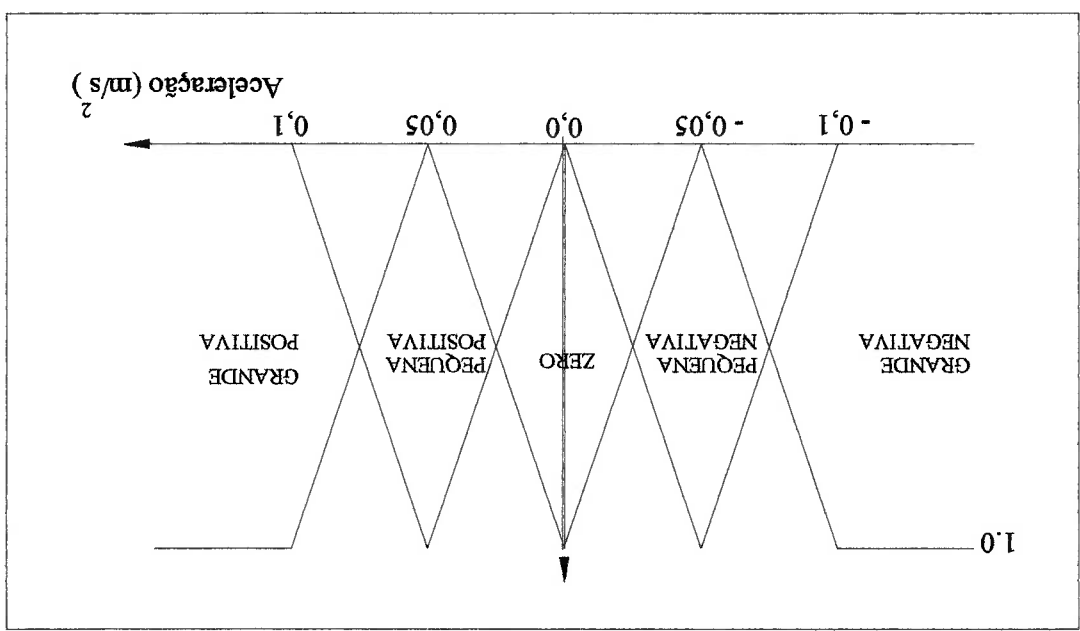


Tabela 6.1 – Termos Linguísticos Associados à Aceleração Longitudinal

Termo Linguístico	Peso
Grande negativa	-0,5
Pequena negativa	-0,25
Zero	0,0
Pequena positiva	0,25
Grande positiva	0,5

6.3.2 Fuzzyficação da velocidade da composição

A variável real velocidade, medida na locomotiva da composição é fuzzyficada como mostra a Figura 6.4.

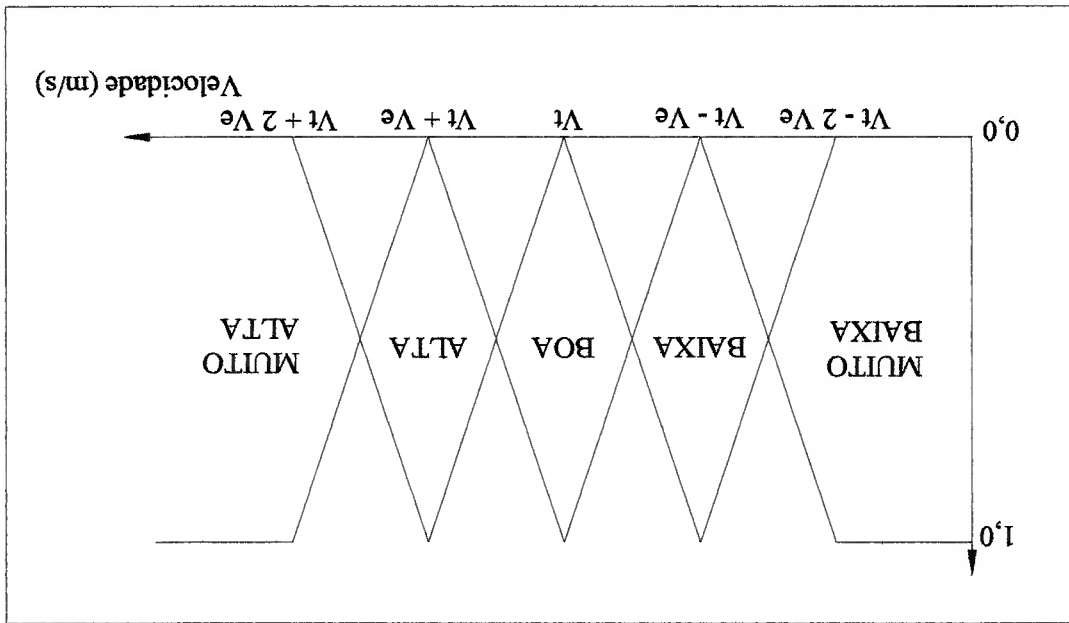


Figura 6.4 - Fuzzyficação da Variável Velocidade

A fuzzyficação da velocidade é realizada em função do valor ideal da velocidade para cada bloco da via, aqui denotado por V_i . É definida, ainda, uma faixa de tolerância para a variação da velocidade, V_e , sendo que para o intervalo $V_i - V_e \leq V \leq V_i + V_e$, a velocidade da composição é considerada boa.

A variável real velocidade da composição é transformada pelo processo de fuzzyficação em uma variável lingüística formada pelos seguintes termos lingüísticos: muito baixa, baixa, boa, alta, muita alta. A cada termo lingüístico corresponde um conjunto fuzzy, descrito por uma função pertinência, e a cada conjunto fuzzy está associado um peso, conforme indicado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Termos Lingüísticos Associados à Velocidade

Termo Lingüístico	Peso
Muito baixa	-1,0
Baixa	-0,5
Boa	0,0
Alta	0,5
Muito alta	1,0

6.3.3 Fuzzyficação do perfil vertical compensado da via

A variável perfil vertical compensado é composta pelo perfil vertical da via e pela curvatura da via.

O perfil vertical compensado atual corresponde ao perfil da via relativo à posição da locomotiva líder. Por perfil futuro entende-se o conhecimento que o maquinista tem do perfil da via alguns metros à frente. A variação do perfil vertical compensado da via futuro é feita de forma contínua para simular o conhecimento que o maquinista tem de todo o trecho de via envolvido na operação.

O perfil vertical compensado da via atual e da via futura foram fuzzyficados da mesma forma, conforme indicado na Figura 6.5.

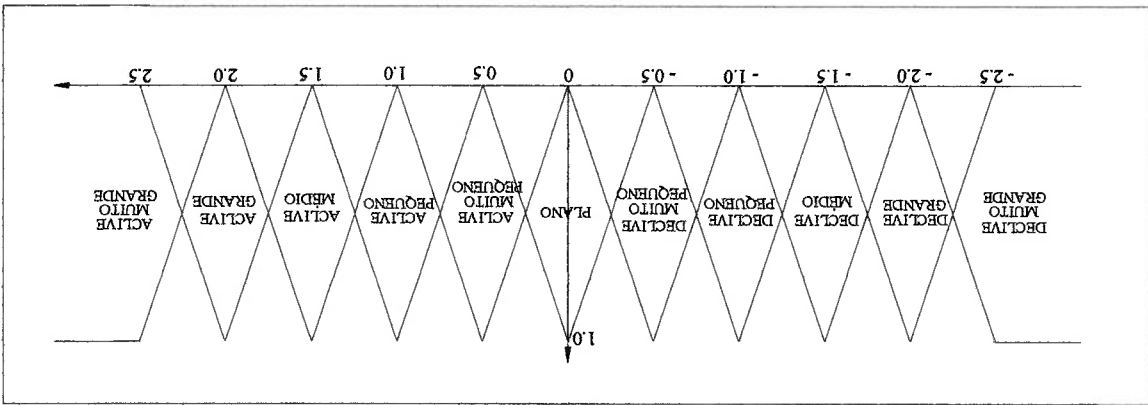


Figura 6.5 – Fuzzyficação do Perfil Vertical Compensado da Via

A variável linguística perfil vertical compensado é formada pelos seguintes termos linguísticos: declive muito pequeno, declive grande, declive médio, declive pequeno, declive muito pequeno, tangente, acline muito pequeno, acline pequeno, acline médio, acline grande, acline muito grande.

A variável intervalo de tempo, desde que houve a última intervenção no ponto de operação de tração (ts), é utilizada para garantir que os esforços nos engates sejam minimizados durante todos os procedimentos de operação que

de operação

6.3.4 Fuzzyficação da variável intervalo de tempo de intervenção no ponto

1,0	Active muito grande
0,8	Active grande
0,6	Active médio
0,4	Active pequeno
0,2	Active muito pequeno
0,0	Plano
-0,2	Deceive muito pequeno
-0,4	Deceive pequeno
-0,6	Deceive médio
-0,8	Deceive grande
-1,0	Deceive muito grande
Peso	Termo Lingüístico

Compensado

Tabela 6.3 Termos Lingüísticos Associados ao Perfil Vertical

indicado pela Tabela 6.3.

A cada termo lingüístico corresponde um conjunto fuzzy, descrito por uma função pertinência, e a cada conjunto fuzzy está associado um peso, conforme

envolvem mudança de ponto. A variável ts é avaliada em função do parâmetro de tração possa ocorrer. O valor numérico do parâmetro Tms varia de acordo com o tipo de procedimento operacional que está sendo realizado.

A variável linguística ts é formada por dois termos linguísticos: bom e mau, associados a conjuntos fuzzy, conforme indicado na Figura 6.6 .

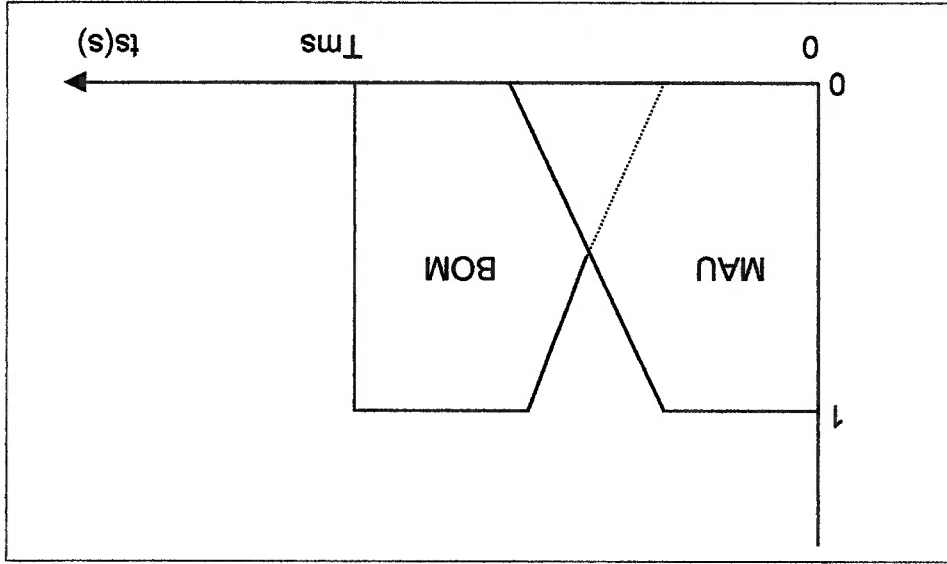


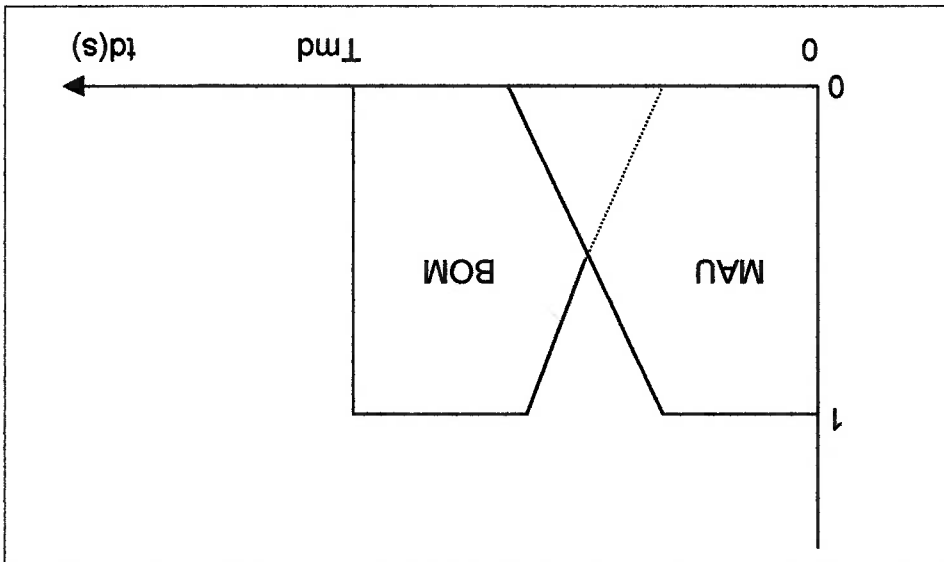
Figura 6.6 - Fuzzyficação da Variável Intervalo de Tempo Disponível para Intervenção no Ponto de Tração

Analogamente, é possível definir a variável td , intervalo de tempo desde que houve a última alteração no ponto de aplicação de freio dinâmico, em função do parâmetro Tmd , que é definido como o tempo ideal para realizar uma nova intervenção no freio dinâmico da locomotiva, sem que ocorram grandes esforços nos engates. O valor do parâmetro Tmd também varia de acordo com o tipo de operação que está sendo realizada.

A variável intervalo de tempo limite, t_{lim} , representa o intervalo de tempo necessário para que a composição possa atingir com segurança a posição X_{lim} , a partir da qual o limite superior de velocidade é inferior ao limite atual de velocidade. A variável linguística intervalo de tempo limite é composta dos seguintes termos: bom, médio e mau, conforme está ilustrado na Figura 6.8.

6.3.5 Intervalo de tempo para redução da velocidade

Figura 6.7 - Fuzzificação da Variável Intervalo de Tempo Disponível para Alteração no Ponto de Freagem Dinâmica



A variável linguística t_d é formada por dois termos linguísticos: bom e mau, associados a conjuntos fuzzy, conforme indicado na Figura 6.7.

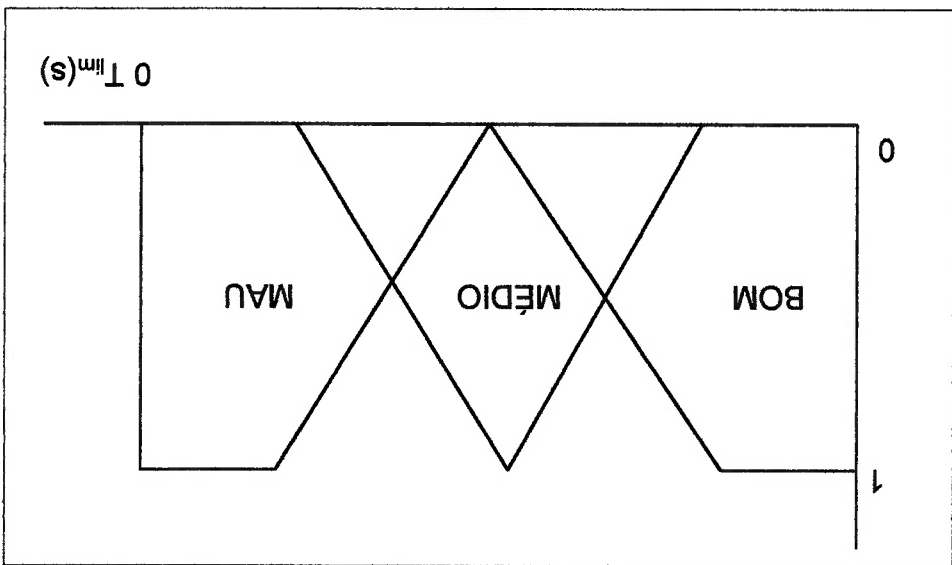
- Procedimento de partida da composição no plano,
 - Procedimento de viagem em regime,
- estratégicos, que podem ser divididos em três tipos distintos:

em que para na estação B, é necessário um conjunto de procedimentos a composição parte, a partir do estado de repouso, da estação A, até o instante Para realizar uma operação ferroviária típica, ou seja, desde o instante em que procedimento operacional.

estratégias de operação ferroviária que são utilizados em qualquer tipo de conhecimentos fundamentais baseados em formas de operação e de fuzzy para auxiliar operações ferroviárias, existe um conjunto de mais importante de um controlador baseado em lógica fuzzy. No controlador A base de conhecimento e as regras de inferência compreendem o módulo

6.4 Base de Conhecimento e Regras de Inferência

Figura 6.8 – Fuzzificação da Variável Intervalo de Tempo Limite



- Procedimento de parada.

Existem alguns conhecimentos básicos que são comuns aos três tipos de procedimentos operacionais propostos e que estão relacionados, principalmente, aos índices de desempenho associados à segurança da viagem e à minimização dos esforços nos engates (no caso de vagão de carga) ou conforto (para carro de passageiros). Os conhecimentos básicos que envolvem qualquer tipo de operação ferroviária são os seguintes:

- i. Características gerais da locomotiva;
- ii. Tipo de freio dinâmico;
- iii. Peso, comprimento e distribuição de carga do trem;
- iv. Quantidade de folga nos engates do trem;
- v. Condição das folgas nos engates do trem (trem esticado ou comprimido);
- vi. Pressão do freio pneumático;
- vii. Curvaturas da via ao longo de todo o trajeto;
- viii. Atalhes/declives da via ao longo de todo o trajeto;
- ix. Condições do trilho (coeficiente de atrito).

6.4.1 Procedimento de partida

O *procedimento de partida* inicia-se quando a composição deixa o estado de repouso e começa a se movimentar, acelerando lentamente, aplicando pouca tração. Este procedimento é finalizado quando o último veículo da composição começa a se movimentar.

Durante o procedimento de iniciar o movimento do trem, algumas regras básicas devem ser sempre observadas:

- > RI-1: Ter conhecimento do posicionamento atual da composição na via, importante verificar se os freios de todos os vagões já foram totalmente aliviados, ou seja, não há freio pneumático aplicado.

- > RI-3: Como o esforço de tração gerado por uma locomotiva elétrica ou diesel-elétrica para iniciar o movimento é muito grande, aproximadamente 0,25 do peso da locomotiva, a aplicação do esforço de tração deve ser realizada com muito cuidado, lentamente, verificando sempre o valor registrado pelo Indicador de Corrente.

- > RI-4: Verificar a existência e localização das folgas nos engates da composição. Quando o movimento da composição é inicializado em um perfil plano, a função das folgas é permitir que cada veículo da composição comece a se movimentar individualmente, ou seja, um vagão de cada vez. Esse procedimento é aconselhável para os casos em que o indicador de Corrente registrar um valor muito alto nas condições sem folga.

- > RI-5: Para iniciar o movimento, deve-se escolher o ponto de tração entre 1 e 3, nunca superior a 4, e ir aumentando de forma lenta e gradual. A velocidade da locomotiva deve ser mantida baixa e constante, até que a parte traseira da composição tenha começado a se movimentar. O ponto de

tração deve ser mantido baixo, para que a velocidade da locomotiva não ultrapasse a 6 km/h.

> RI-6: O ponto de tração não deve ser incrementado enquanto o indicador de Corrente estiver crescendo.

> RI-7: Para iniciar o movimento da composição em um perfil topográfico com curvas, a aplicação do esforço de tração deve ser realizada de forma mais cuidadosa que nos casos de perfil tangente, pois a aplicação de um esforço de tração maior pode empurrar um vagão mais leve para dentro da via, principalmente nos casos de curvas mais fechadas.

> RI-8: Se a locomotiva começar a patinar, o ponto de tração deve ser reduzido. As vezes, é necessário retirar totalmente o ponto de tração, considerar folgas e recomeçar o movimento.

Durante o procedimento de partida da composição, o índice de desempenho utilizado é o de minimização dos esforços longitudinais nos engates e aparelho de choque e tração.

Para avaliar o estado do sistema durante o procedimento de partida são analisadas as seguintes variáveis:

- > intervalo de tempo desde a última intervenção no ponto de tração,
- > corrente do gerador,
- > ponto de tração da locomotiva líder,

- segurança de viagem,
- minimização dos esforços longitudinais nos engates,
- otimização da tragaabilidade da velocidade,
- minimização do tempo de percurso,
- redução do consumo de combustível.

objetivo de otimizar os seguintes índices de desempenho:

No procedimento de viagem em regime, toda a operação é realizada com o

permittedo que deve sempre ser respeitado.

A via férrea é dividida em blocos, cujos comprimentos podem ser constantes ou variáveis, porém, a cada bloco está associado um valor de velocidade máxima

6.4.2 Procedimento de viagem em regime

O procedimento de partida é finalizado quando o último veículo da composição começa a se movimentar no sentido positivo do deslocamento. A partir deste instante, começa a atuar o procedimento de viagem em regime.

- > velocidade da locomotiva líder,
- > deslocamento longitudinal do último veículo da composição,
- > velocidade do último veículo da composição,
- > pressão de aplicação nos cilindros do freio,
- > freio independente da locomotiva.

Observação: os índices de desempenho minimização do tempo de percurso e redução do consumo de combustível são conflitantes. Durante o procedimento de viagem deve-se optar por um ou outro.

Assim que o procedimento de partida for concluído, deve ser inicializado o procedimento de viagem, no qual a composição deve ser acelerada até atingir a velocidade típica (V_t) para o bloco de via correspondente.

A velocidade típica deve ser sempre mantida um pouco abaixo da velocidade limite, (V_{max}), para que a minimização do tempo de percurso possa ser realizada com sucesso. A velocidade limite, neste estudo, ficou definida como:

$$V_{max} = V_t + 2 V_e \quad \text{onde } V_e = 0,05 \cdot V_t \quad (6.1)$$

Para que cada um dos índices acima definidos sejam satisfeitos, é necessário desenvolver um conjunto de regras. As principais regras de controle de operação, aqui chamadas de *macro-regras*, baseadas em conhecimentos de maquinistas experientes são definidas a seguir:

> RV-1: (*Manutenção da segurança*):

a) Se a velocidade da composição exceder o limite de velocidade (V_{max}), deve-se selecionar o procedimento de redução de velocidade com urgência.

b) Se o limite de velocidade no próximo bloco for inferior ao limite de

velocidade do bloco atual, deve-se selecionar o procedimento para reduzir a

velocidade.

> RV-2: (*Minimização dos esforços nos engates*): Se a velocidade da

composição estiver dentro da faixa permissível, o ponto (tração ou

frenagem) aplicado não deve ser alterado.

> RV-3: (*Minimização do tempo de viagem*): Se a velocidade do trem estiver

abaixo do limite inferior permitido, então um novo ponto de tração deve ser

selecionado.

> RV-4: (*Maximização da traçabilidade da velocidade*): Se a velocidade da

composição estiver fora da faixa aceitável ($V_t - V_e \leq V \leq V_t + V_e$) então um

novo ponto de tração ou frenagem deve ser selecionado.

> RV-5: (*Minimização do consumo de combustível*): O ponto de tração pode

ser reduzido ou mesmo colocado em ponto morto desde que o tempo

previsto para a viagem seja mantido.

No procedimento de viagem em regime, o controlador fuzzy pode tomar três

tipos de atitudes:

- manter a velocidade atual,

- reduzir a velocidade atual,

- aumentar a velocidade atual.

O estado do sistema controlado é avaliado a cada 0,01s, e para tal análise são

consideradas as seguintes variáveis:

- velocidade atual da locomotiva líder,
- aceleração atual da locomotiva líder,
- perfil compensado atual da via (posição atual da locomotiva líder),
- perfil compensado futuro próximo da via (aproximadamente 50 m a frente da locomotiva líder),
- perfil compensado futuro da via (aproximadamente 1000 m a frente da locomotiva líder),
- tempo real gasto até o instante atual para realizar a viagem,
- tempo ideal, calculado até o instante atual, para realizar a viagem.

Analisando as variáveis acima e considerando as macros regras associadas aos índices de desempenho, é possível definir o procedimento para aumentar ou diminuir a velocidade.

• ***Procedimento para aumentar velocidade***

Para aumentar a velocidade da composição, deve-se observar as seguintes regras:

> RV-6: se o trem estiver sendo tracionado ou em ponto morto, então o ponto de tração pode ser incrementado, desde que as seguintes condições sejam satisfeitas totalmente ou parcialmente:

i. tempo para mudança de ponto (ts) estiver bom;

ii. a corrente do gerador estiver boa;

redução de velocidade).

igual à velocidade ideal atual (ou seja, não há previsão de

ii. a velocidade ideal para a posição futuro distante for maior ou perfil atual;

i. o perfil compensado futuro próximo da via for menor ou igual ao seguintes condições sejam satisfeitas:

pneumático, então deve-se acionar o alívio dos freios desde que as

> RV-8: se o trem estiver sendo freado com aplicação de freio

redução de velocidade).

igual à velocidade ideal atual (ou seja não há previsão de

iii. a velocidade ideal para a posição futuro distante for maior ou perfil atual;

ii. o perfil compensado futuro próximo da via for menor ou igual ao

i. o tempo para mudança no freio dinâmico (td) estiver bom;

desde que as seguintes condições sejam satisfeitas:

proporção de aplicação de freio dinâmico deve ser decrescentada,

> RV-7: se o trem estiver sendo freado com freio dinâmico, então a

redução de velocidade).

igual à velocidade ideal atual (ou seja não há previsão de

iv. a velocidade ideal para a posição futuro distante for maior ou perfil atual;

iii. o perfil compensado futuro próximo da via for menor ou igual ao

• **Procedimento para reduzir velocidade**

Para reduzir a velocidade da composição deve-se observar as seguintes

regras:

> RV-9: se o trem estiver sendo tracionado, então o ponto de tração

pode ser decrementado desde que as seguintes condições sejam

satisfeitas total ou parcialmente:

i. tempo para mudança de ponto (td) estiver bom;

ii. o perfil compensado futuro próximo da via for maior ou igual ao

perfil atual;

iii. a velocidade ideal para a posição futuro distante for menor ou

igual à velocidade ideal atual (ou seja não há previsão de

aumento de velocidade).

> RV-10: Se o trem estiver em ponto morto, ponto de tração nulo, ou

sendo freado com freio dinâmico, então a proporção de aplicação de

freio dinâmico deve ser incrementada em 10% se as seguintes

condições forem satisfeitas:

i. o tempo para mudança no freio dinâmico (td) estiver bom;

ii. o perfil compensado futuro próximo da via for maior ou igual ao

perfil atual;

iii. a velocidade ideal para a posição futuro distante for menor ou

igual à velocidade ideal atual (ou seja não há previsão de

aumento de velocidade).

- compressão nos engates.
- ser iniciado de forma lenta e gradual, a fim de evitar grandes esforços de
- > RS2: Assim que o ponto P for atingido, o processo de desaceleração deve
- ponto P, para não comprometer o tempo de viagem.
- > RS1: Os freios não devem ser aplicados antes da composição atingir o
- um conjunto de regras que devem ser avaliadas paralelamente. São elas:
- ser parada. Neste procedimento, o ponto de operação é selecionado a partir de
- parada ou sempre que o maquinista receber instrução que a composição deve
- ponto da via, aqui denominado de ponto P, em que estiver sinalizada a próxima
- O procedimento de parada será iniciado assim que a composição passar pelo

6.4.3 Procedimento de parada

- aumentar de velocidade).
- igual à velocidade ideal atual (ou seja, não há previsão de
- ii. a velocidade ideal para a posição futuro distante for menor ou
- perfil atual;
- i. o perfil compensado futuro próximo da via for maior ou igual ao
- pneumático quando as seguintes condições forem satisfeitas:
- proporção maior que 70%, então deve ser aplicado o freio
- > RV-11: se o trem está sendo freado somente com freio dinâmico, em

- RS3: Se o ponto de tração estiver acionado, este deve ser reduzido, segundo as regras de redução de ponto, até atingir o ponto nulo (ou ponto neutro).
- RS4: Manter em ponto neutro, pelo intervalo de tempo recomendado, antes de iniciar a aplicação do freio dinâmico.
- RS5: Aplicar lentamente o freio dinâmico, verificando sempre a velocidade da composição, o tempo disponível de viagem e a distância até o ponto de parada final, aqui denominado de ponto S.
- RS6: A uma distância suficiente do ponto S, aplicar, se necessário para que a parada seja bem sucedida, o freio pneumático, com redução mínima. Aplicar, se necessário, no mesmo instante, os freios independentes da locomotiva.
- RS7: Reaplicar freios pneumáticos, se necessário, até que a composição pare totalmente. Esperar sempre, pelo menos 10 segundos, para fazer uma nova reaplicação.
- RS8: Quando a velocidade for inferior a 10 km/h, manter a aplicação de freio até a parada total da composição.
- RS9: Quando a composição estiver totalmente parada, aplicar os freios independentes da locomotiva.

Todas as formulações adotadas no programa foram obtidas a partir de modelos matemáticos calibrados com dados obtidos nas especificações de componentes dos fabricantes e em ensaios de campo. Cada simulação foi realizada a partir das informações das características do trem configurado, de seus componentes e dos comandos gerados pelo controlador fuzzy. O controlador fuzzy tem à sua disposição comandos semelhantes aos utilizados pelo maquinista, permitindo total autonomia sobre as variáveis do programa durante as simulações. No programa original, a operação do trem era realizada pelo usuário através de comandos via teclado do computador. No programa atual, desenvolvido pela autora, a interface via teclado foi suprimida e a operação é totalmente acionada pelo controlador fuzzy proposto.

As simulações foram realizadas utilizando o simulador de operação ferroviária, desenvolvido pela equipe técnica do Agrupamento de Desenvolvimento Ferroviário da Divisão de Tecnologia de Transportes do IPT, que é um programa desenvolvido em Turbo Pascal e que utiliza o modelo não linear da dinâmica longitudinal de um trem, descrito no Capítulo 3.

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais resultados obtidos nas simulações de operação ferroviária controladas pelo controlador fuzzy projetado, descrito no Capítulo 6.

7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A integração numérica foi feita pelo Método de Runge Kutta, de quarta ordem, descrito no ANEXO C, com passo de integração de 0,001s. O programa de para o controlador foi de 0,010s. Os dados de entrada do programa de simulação relativos à composição são fornecidos no ANEXO B.

Para analisar o comportamento do controlador fuzzy, foram realizadas algumas simulações considerando como entrada para o sistema dinâmico dois tipos de

via férrea:

- via padrão,
- via real.

A via, aqui denominada de padrão, é constituída por trechos em tangente (retas), acíves, declives e curvas, conforme indicado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Dados da Via Padrão

pos.inicial (km)	pos.final (km)	inclinação (%)	raio curv. (m)	vel.ideal (km/h)	tempo inic (s)	tempo final (s)
0,00	5,00	0,00	0,00	50,00	0,00	360,00
5,00	5,60	0,00	400,00	50,00	360,00	403,20
5,60	6,20	0,00	0,00	50,00	403,20	446,40
6,20	6,55	1,15	0,00	50,00	446,40	471,60
6,55	7,25	0,00	0,00	50,00	471,60	522,00
7,25	8,05	0,00	2200,00	50,00	522,00	579,60
8,05	8,45	-1,45	0,00	50,00	579,60	608,40
8,45	9,50	0,00	0,00	50,00	608,40	684,00

As colunas da tabela acima indicam:

pos.inicial: posição inicial (Km);

pos.final: posição final (Km);

inclinação: perfil vertical da via (%);

Observação: na coluna raio_curv, o valor 0,0 indica tangente, ou seja raio de curvatura ∞.

As Figuras 7.1 e 7.2 ilustram o perfil topográfico da via descrito acima.

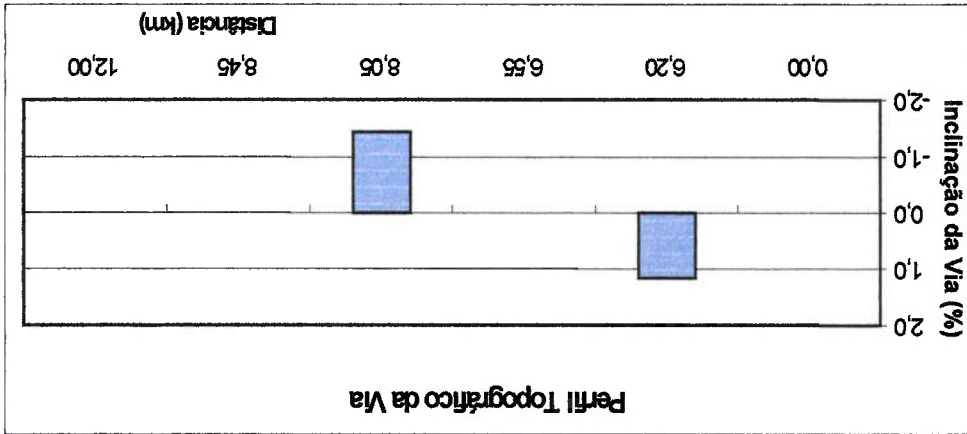


Figura 7.1 – Inclinação da Via Padrão

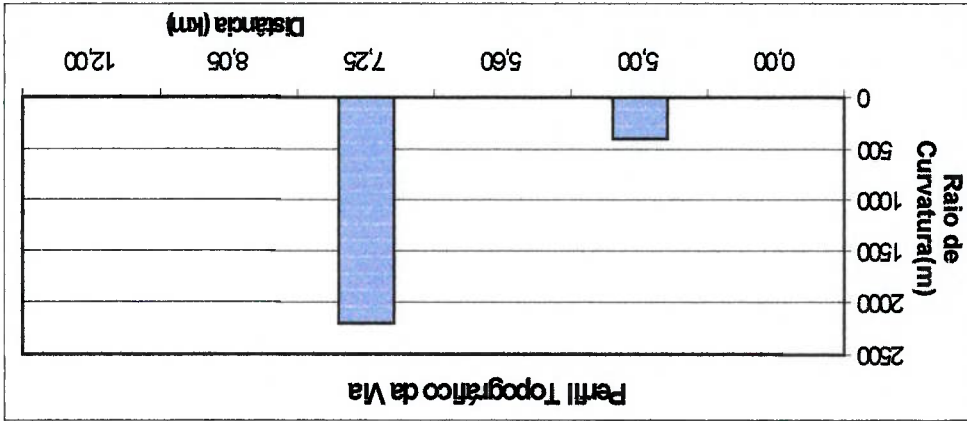


Figura 7.2 – Raio de Curvatura da Via Padrão

Considerando a via padrão como entrada para o sistema que representa a

dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária, foi analisada a influência

das ações do controlador fuzzy em relação a:

i) o comportamento dinâmico global do trem,

ii) a variação do carregamento dos vagões do trem,

iii) a variação do comprimento do trem.

Como via real foi considerado um trecho de via extraído de uma ferrovia

paulista, bastante acidentado, conforme mostra a Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Dados da Via Real

pos.inicial (km)	pos.final (km)	inclinação (%)	raio cv (m)	vel.ideal (km/h)	tempo inic. (s)	tempo final (s)
0,00	0,35	0,00	0,00	50,00	0,00	25,20
0,35	1,52	0,00	0,00	50,00	25,20	109,44
1,52	1,91	0,00	0,00	50,00	109,44	137,52
1,91	1,98	0,00	399,78	50,00	137,52	142,56
1,98	2,36	-0,70	399,78	50,00	142,56	169,92
2,36	2,40	-0,70	0,00	50,00	169,92	172,80
2,40	2,90	0,00	0,00	50,00	172,80	208,80
2,90	4,00	-1,00	0,00	50,00	208,80	288,00
4,00	5,00	0,00	500,00	50,00	288,00	360,00
5,00	6,50	0,00	0,00	50,00	360,00	468,00
6,50	6,80	0,95	0,00	50,00	468,00	489,60
6,80	6,95	1,23	0,00	50,00	489,60	500,40
6,95	7,05	1,05	0,00	50,00	500,40	507,60
7,05	7,30	1,50	0,00	50,00	507,60	525,60
7,30	8,50	-0,50	0,00	50,00	525,60	612,00
8,50	9,80	-0,50	572,99	50,00	612,00	705,60
9,80	10,30	0,00	572,99	50,00	705,60	741,60
10,30	11,00	0,50	572,99	50,00	741,60	792,00
11,00	12,50	0,00	0,00	50,00	792,00	900,00
12,50	13,00	-0,33	0,00	50,00	900,00	936,00
13,00	13,50	-0,50	0,00	50,00	936,00	972,00
13,50	15,00	0,00	0,00	50,00	972,00	1080,00
15,00	16,20	-0,93	0,00	50,00	1080,00	1166,40
16,20	18,00	-0,93	1145,93	50,00	1166,40	1296,00
18,00	20,00	0,00	0,00	50,00	1296,00	1440,00

As Figuras 7.3 e 7.4 ilustram o perfil topográfico da via, composto respectivamente, pela inclinação vertical e pelo raio de curvatura.

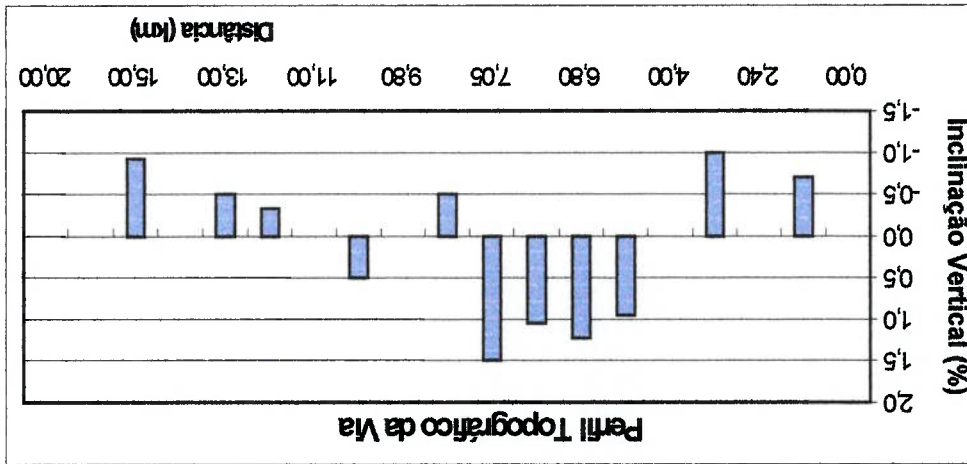


Figura 7.3 – Inclinação Vertical da Via Real

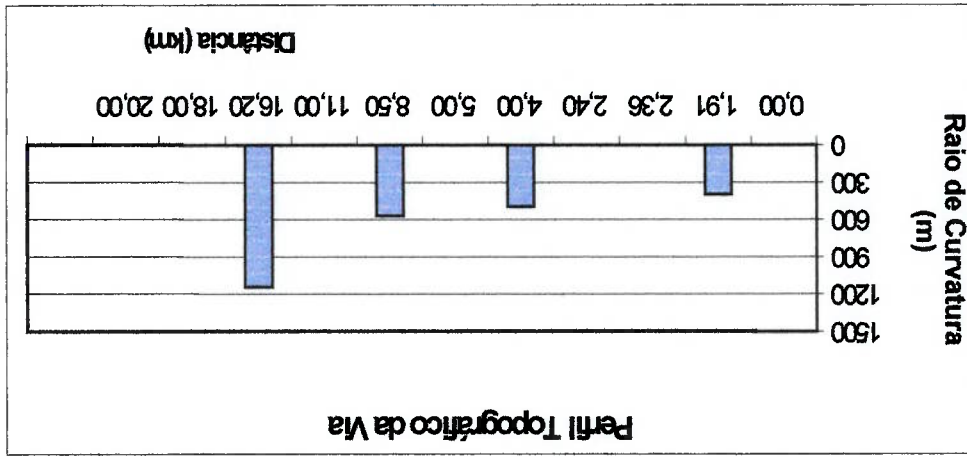


Figura 7.4 – Raio de Curvatura da Via Real

Considerando a via real como entrada para o sistema que representa a dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária, foi analisada a influência das ações do controlador fuzzy em relação:

- i) ao comportamento dinâmico global do trem,
- ii) à variação do carregamento dos vagões do trem.

Nos cinco casos testados foi simulada uma viagem completa, englobando, portanto, os procedimentos de partida, de viagem em regime e de parada. Os resultados apresentados para o procedimento de partida englobam o procedimento de partida propriamente e um trecho do procedimento de viagem, que corresponde ao trecho em que a composição está sendo acelerada e ainda não atingiu a velocidade de regime, típica do trecho. Os resultados apresentados para o procedimento de viagem em regime vão do instante em que a velocidade típica é atingida até o início do procedimento de parada.

Os resultados das simulações, apresentados em forma de séries temporais de algumas variáveis de estado do sistema, encontram-se no ANEXO A.

Os objetivos de controle foram os mesmos para os cinco casos considerados: no procedimento de partida, o objetivo foi *minimizar os esforços de tração nos engates*; no procedimento de viagem em regime buscou-se, em conjunto, *minimizar os esforços nos engates, maximizar a tratabilidade da velocidade, minimizar o tempo de percurso e garantir a segurança da viagem*; e o procedimento de parada foi realizado *minimizando os esforços de compressão nos engates*.

7.1 Apresentação dos Resultados para a Via Padrão

Durante as simulações realizadas considerando a via padrão, foram registradas as seguintes variáveis:

Considerando a Figura 7.5, que ilustra o comportamento dos esforços máximos de tração ao longo do comprimento do trem, é possível afirmar que este procedimento foi bem conduzido, pois os esforços máximos de tração registrados nos engates foram relativamente pequenos, sendo que o valor máximo, presente no primeiro engate após a locomotiva, foi de 19,10tf.

7.1.1.1 Análise do procedimento de partida

A série temporal das variáveis registradas durante a simulação, estão ilustradas no ANEXO A e correspondem às Figuras de A.9 à A.16.

Para a análise do comportamento global da composição, ao longo de toda a viagem, foi considerada uma composição típica, composta de 1 locomotiva e 20 vagões, cada um com carga bruta de 80.000kg.

7.1.1 Análise do comportamento dinâmico global da composição

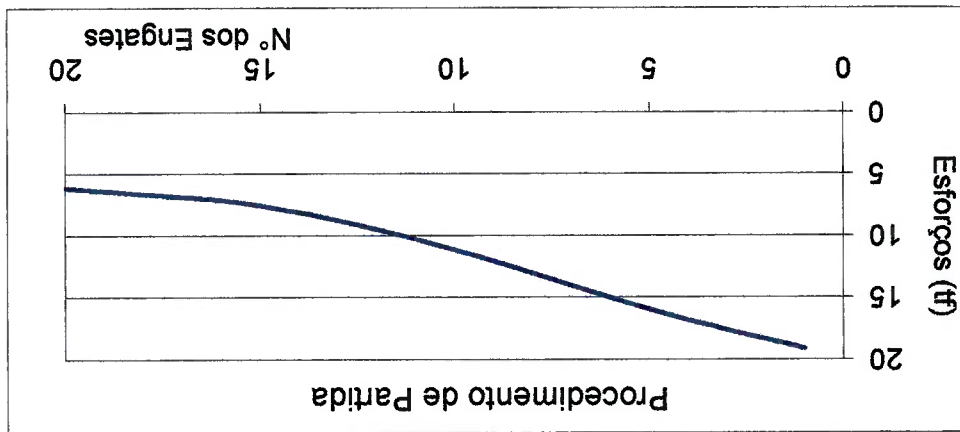
- > velocidade da locomotiva líder (km/h);
- > ponto de tração/ proporção de freio dinâmico;
- > aceleração longitudinal média da composição (m/s^2);
- > força no 1º engate posicionado após a última locomotiva (tf);
- > força no engate posicionado a um quarto do comprimento do trem (tf);
- > força no engate posicionado no meio do trem (tf);
- > força no engate posicionado a três quartos do comprimento do trem(tf);
- > força no último engate do trem (tf);

Analisando os resultados da simulação, é possível afirmar que:

a) os esforços nos engates foram minimizados, pois, pela Figura 7.6, é possível verificar que tanto os esforços máximos de tração como os esforços de compressão foram mantidos dentro de uma faixa de valores aceitáveis. É importante observar ainda, que tanto os valores médios como os valores de RMS ("root mean square") foram baixos, indicando que há

7.1.1.2 Análise do procedimento de viagem em regime

Figura 7.5 – Esforços de Tração nos Engates



A velocidade foi mantida baixa, até que toda a composição tivesse iniciado o movimento, e o procedimento de viagem em regime foi iniciado quando o último vagão apresentou deslocamento no sentido positivo e a velocidade da composição registrada neste instante foi de 14,0 km/h.

A aceleração manteve-se baixa, o valor médio foi de 0,044m/s², e o valor máximo atingido foi de 0,103m/s².

a) a taxa de desaceleração foi de 0,201 m/s²;

Analisando o procedimento de parada é possível verificar que:

7.1.1.3 Análise do procedimento de parada

realizado na simulação foi de 638,0s.

d) o tempo de percurso ótimo estimado foi de 636,5s e o tempo de percurso

operacional realizado foi satisfatório;

c) o freio pneumático não foi utilizado, indicando que o procedimento

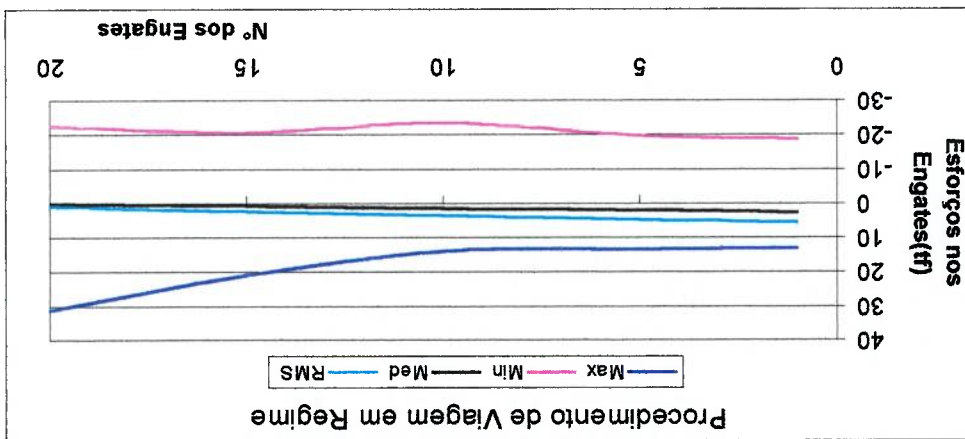
mínimo de 44,90km/h;

regime, foi de 49,88km/h, atingindo o valor máximo de 52,36km/h, e o valor

adequado, pois o valor médio, durante todo o procedimento de viagem em

b) analisando a Figura A.9 é possível concluir que o traçado da velocidade é

Figura 7.6 – Esforços nos Engates no Procedimento de Viagem em Regime



probabilidade de fadiga nos engates, devido a esses esforços, é pequena; pouca energia associada a esses movimentos, e que, consequentemente, a

b) considerando a Figura 7.7, verifica-se que os esforços máximos de compressão atingiram valores mais significativos do meio para o fim do trem, o que era esperado, por ocorrer, de forma semelhante, em testes reais. Os valores de RMS ("root mean square"), contudo, aos quais estão associadas as energias contidas nestes esforços, tendem a diminuir do meio para o fim do trem.

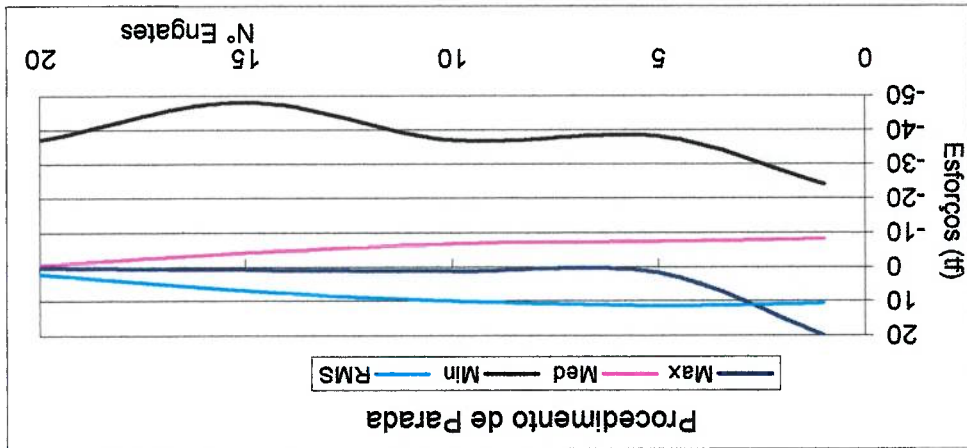


Figura 7.7 - Esforços nos Engates no Procedimento de Parada

7.1.2 Análise do comportamento do controlador fuzzy quanto à variação do carregamento dos vagões do trem

Para avaliar o comportamento do controlador fuzzy, com relação à variação do carregamento dos vagões do trem, foram realizadas três simulações para um mesmo trem típico, composto de uma locomotiva e 20 vagões carregados, sendo que a variação do peso bruto de cada vagão está indicada na Tabela 7.3.

A Figura 7.8 apresenta os esforços máximos de tração, ocorridos ao longo da composição, para os três tipos de carregamentos analisados. Como era esperado, o maior esforço ocorreu sempre no primeiro engate após a locomotiva. Os valores máximos encontrados foram 17,93tf, 18,11tf e 19,80tf, respectivamente para os trens leve, médio e pesado. Apesar do trem pesado pesar 240% do trem leve, a diferença de carga, por vagão, entre o trem leve e o pesado era de 70.000kg, a diferença no esforço máximo foi de 1,87tf, ou seja, apenas 10%. Este fato é resultado da ação do controlador fuzzy que trabalha

A Tabela 7.4 apresenta os resultados estatísticos para o procedimento de partida, para os três tipos de carregamentos considerados: leve, médio e pesado.

7.1.2.1 Análise do procedimento de partida

As séries temporais resultantes das simulações encontram-se no ANEXO A, sendo que as Figuras de A.1 à A.8 correspondem ao trem leve, as Figuras de A.9 à A.16 correspondem ao trem médio e as Figuras de A.17 à A.24 correspondem ao trem pesado.

Tipo de Trem	Peso Vagão(kg)
Leve	50.000
Médio	80.000
Pesado	120.000

Tabela 7.3 – Peso Bruto dos Vagões

sempre no sentido de atenuar os esforços de tração durante o procedimento de partida. Para isto, a composição pesada foi inicializada de forma mais lenta que a leve. O procedimento de partida durou 207s para a composição leve e 479s para a composição pesada.

Tabela 7.4 – Resultados Estatísticos para o Procedimento de Partida

Tipo de Composição		Leve			Média			Pesada	
Variaáveis	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média
Velocidade(km/h)	50,03	0,00	23,86	50,11	0,00	25,75	50,02	0,00	27,40
Aceleração(m/s ²)	0,158	0,000	0,067	0,103	0,000	0,044	0,069	0,000	0,029
Est. 1º engate(ft)	17,93	0,00	8,45	19,11	0,00	9,30	19,80	0,00	9,80
Est. 5º Engate(ft)	14,73	0,00	6,75	15,97	0,00	7,41	15,97	0,00	7,30
Est. 10º Engate(ft)	10,85	0,00	4,60	11,11	0,00	5,07	11,31	0,00	5,38
Est. 15º Engate(ft)	6,95	0,00	2,50	7,50	0,00	2,77	7,80	0,00	2,74
Est. 20º Engate(ft)	6,08	0,00	0,42	6,09	0,00	0,46	7,43	0,00	0,49
Duração (s)			207			314			479

Nota: Na coluna Variáveis das Tabelas 7.4, 7.5, 7.6, 7.9, 7.10, 7.11, 7.15, 7.16 e 7.17 o termo Estf. é a forma abreviada para Esforço.

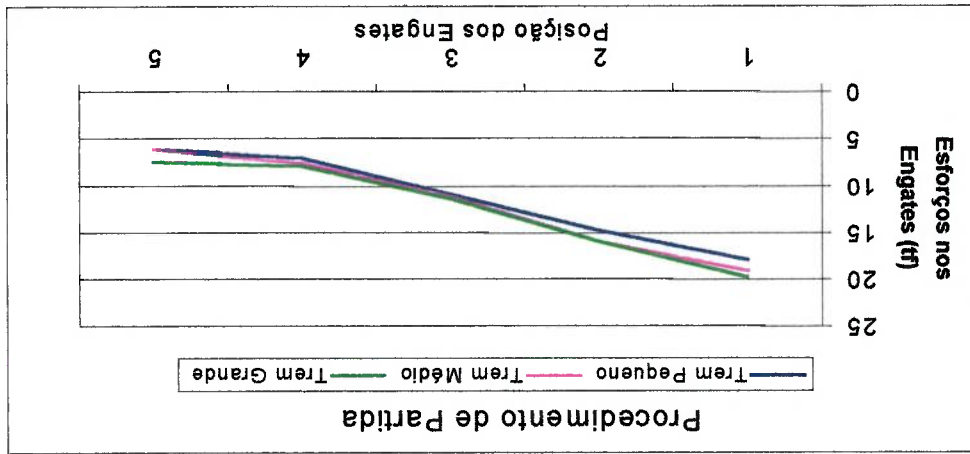


Figura 7.8 - Esforços Máximos de Tração

7.1.2.2 Análise do procedimento de viagem em regime

A Tabela 7.5 apresenta os resultados estatísticos para os três tipos de trens, leve, médio e pesado.

Tabela 7.5 Resultados Estatísticos - Procedimento de Viagem em Regime

Tipo de Composição												
Variáveis	Leve			Média			Pesada			D.P.	Média	
	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média			
Velocidade(km/h)	52,38	46,57	50,53	0,97	52,36	44,90	49,88	1,54	55,23	43,32	49,24	2,30
Aceração(m/s ²)	0,069	-0,137	3,E-04	3,E-04	0,055	-0,101	0,012	0,022	0,019	-0,098	0,001	0,028
Est. 1° Engate(t)	10,10	-20,88	2,06	3,34	13,16	-18,56	2,59	4,97	15,00	-19,57	3,48	6,18
Est.5° Engate(t)	9,98	-15,97	1,65	2,86	13,39	-19,76	2,08	4,28	20,94	-33,68	2,80	5,60
Est.10° Engate(t)	14,00	-20,37	1,14	2,16	13,97	-23,43	1,43	3,30	25,88	-31,96	1,95	4,58
Est. 15° Engate(t)	14,97	-16,10	0,62	1,40	20,94	-20,79	0,79	2,16	33,25	-47,03	1,07	3,43
Est. 20° Engate(t)	20,35	-15,00	0,10	0,53	31,15	-22,59	0,14	0,79	37,86	-46,07	0,19	1,26

Analisando os resultados estatísticos, extraídos da Tabela 7.5 e mostrados na Figura 7.9, é possível concluir que o trágado da velocidade em torno da velocidade típica foi mantido para as três configurações de trem consideradas, apresentando maior variação para a composição pesada, que, ainda assim, foi satisfatório.

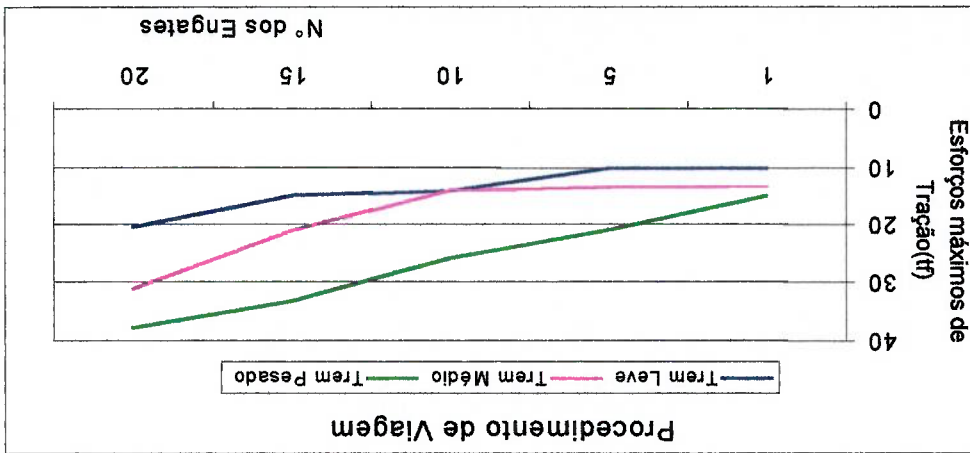
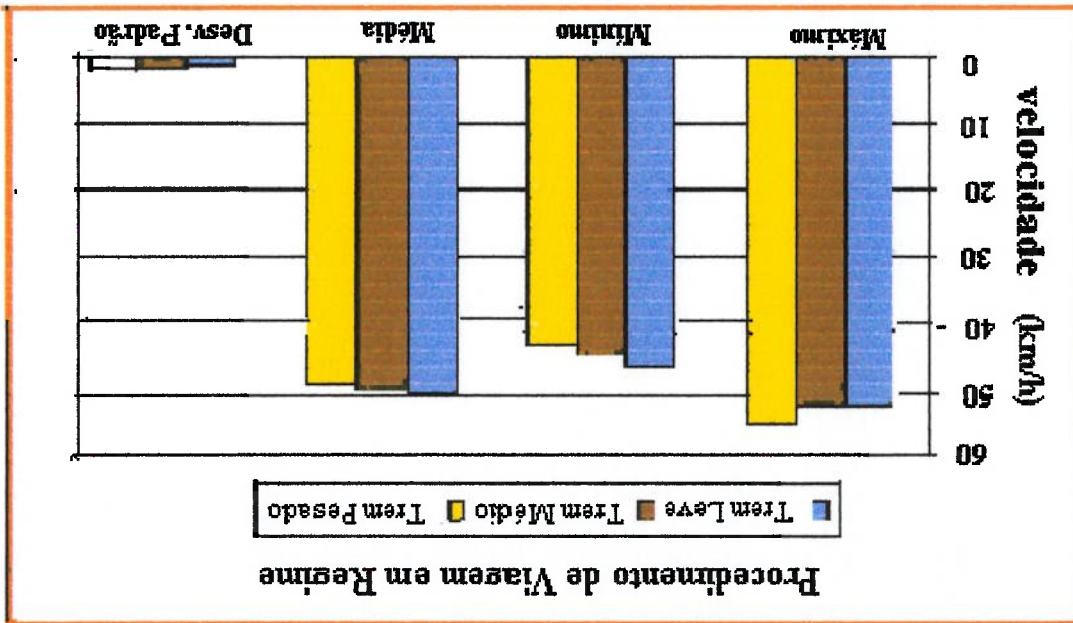


Figura 7.10 – Esforços Máximos de Tração nos Engates

reais.

As Figuras 7.10, 7.11 e 7.12 ilustram, respectivamente, os esforços de tração, compressão e os esforços médios registrados nos engates para os três tipos de trens analisados. Como era esperado, os maiores valores ocorreram no trem pesado, valores estes coerentes com valores encontrados em testes

Figura 7.9 – Resultados Estatísticos para Velocidade



A Tabela 7.6 apresenta os principais resultados estatísticos obtidos para o procedimento de parada.

7.1.2.3 Análise do procedimento de parada

Figura 7.12 – Valores Médios e Desvios Padrão para os Esforços dos Engates

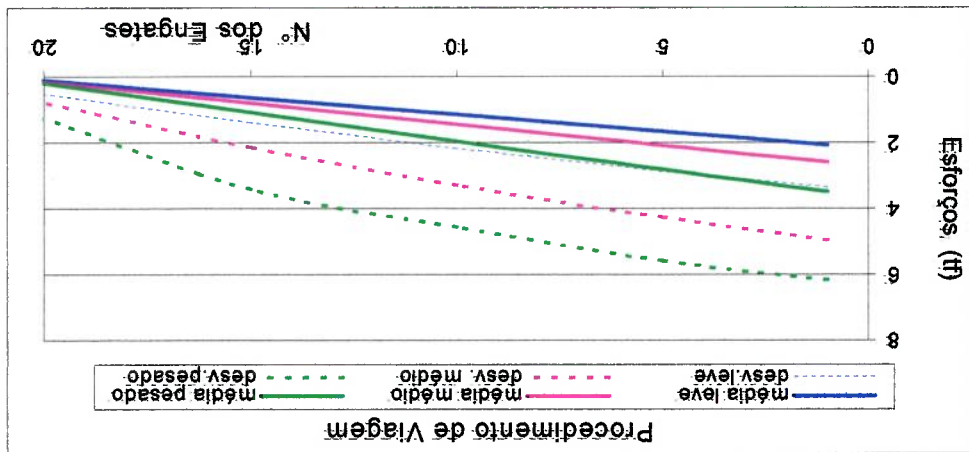
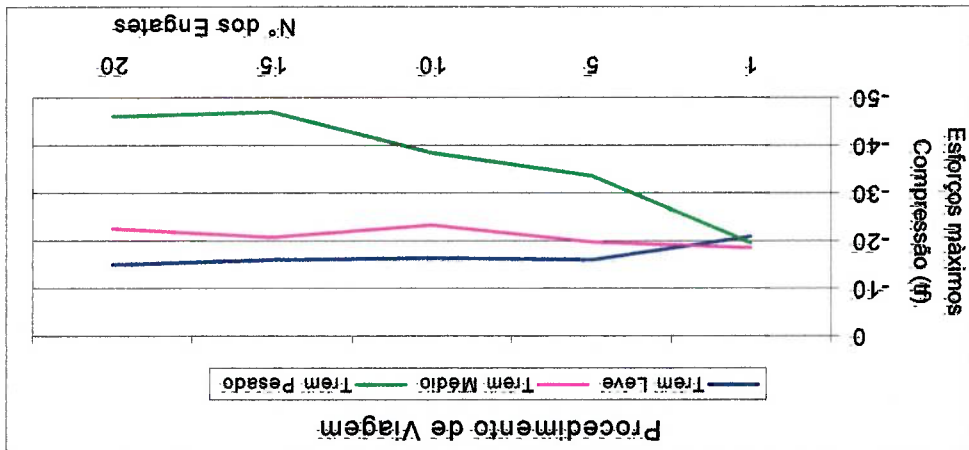
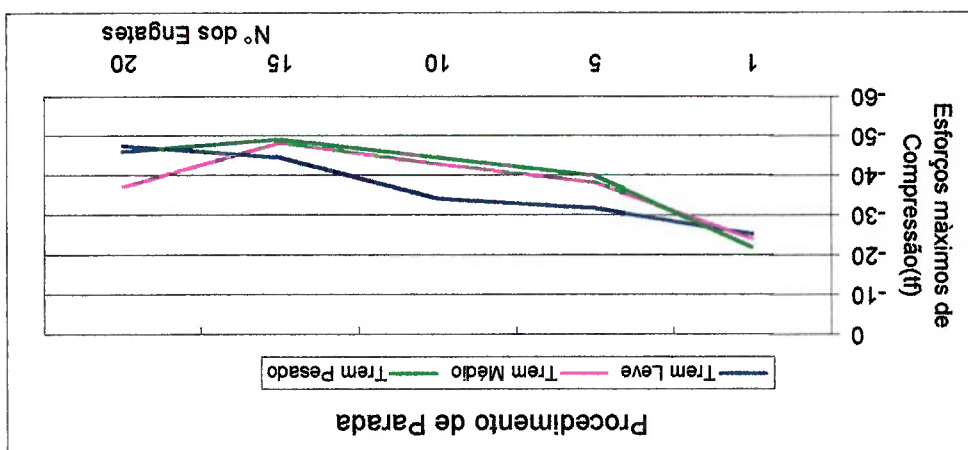


Figura 7.11 – Esforços Máximos de Compressão



A taxa de desaceleração e o tempo de parada obtidos para cada um dos tipos de composição são mostrados na Tabela 7.7.

Figura 7.13 – Esforços de Compressão no Procedimento de Parada



A Figura 7.13 ilustra os esforços máximos de compressão ocorridos durante o procedimento de parada, para cada tipo de composição.

Tipo de Composição		Leve			Média			Pesada		
Variáveis		Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média
Velocidade(km/h)		50,60	0,00	39,22	50,20	0,00	38,10	50,96	0,00	41,75
Aceleração(m/2)		-0,274	-0,805	-0,216	-0,003	-0,878	-0,201	0,008	-0,775	-0,165
Est. 1º Engate(tf)		15,05	-25,44	-6,96	19,96	-24,20	-8,15	20,83	-22,02	-6,71
Est. 5º Engate(tf)		1,68	-31,77	-6,68	1,77	-38,20	-7,27	5,05	-39,94	-7,94
Est. 10º Engate(tf)		1,15	-34,17	-5,22	1,30	-42,95	-6,92	3,64	-44,58	-6,70
Est. 15º Engate(tf)		0,70	-44,60	-3,12	0,80	-48,24	-4,27	2,19	-49,15	-4,20
Est. 20º Engate(tf)		0,13	-47,50	-0,56	0,14	-37,13	-0,77	0,40	-46,07	-0,77
Duração (s)		70			73			85		

Tabela 7.6 - Resultados Estatísticos para o Procedimento de Parada

7.1.3 Análise do comportamento do controlador fuzzy quanto à variação

do comprimento do trem

Para avaliar o comportamento do controlador fuzzy quanto à variação do comprimento do trem, foram considerados três tipos de trens: curto, médio e longo. A configuração de cada um deles é fornecida na Tabela 7.8. Em todos os casos, o peso bruto de cada vagão foi de 70.000kg.

Tabela 7.8 – Configuração dos Trens

Tipo de Trem	Nº de Locomotivas	Nº de Vagões
Curto	1	25
Médio	2	50
Longo	4	100

As séries temporais resultantes dessas simulações encontram-se no ANEXO A, sendo que as Figuras de A.25 a A.32 correspondem ao trem curto, as Figuras de A.33 a A.40 correspondem ao trem médio e as Figuras de A.41 a A.48 correspondem ao trem longo.

Tipo de Trem	Desaceleração (m/s ²)	Tempo de Parada (s)
Pesado	-0,165	85
Médio	-0,201	73
Leve	-0,216	70

Tabela 7.7 – Dados sobre o Procedimento de Parada

7.1.3.1 Análise do procedimento de partida

A Tabela 7.9 apresenta os principais resultados estatísticos obtidos durante o procedimento de partida, para os três tipos de trens considerados.

Tabela 7.9 – Resultados Estatísticos para o Procedimento de Partida

Tipo de Composição												
Curta			Média			Longa						
Variaáveis	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	
Velocidade(km/h)	50,00	0,00	26,87	50,00	0,00	26,8	50,00	0,00	26,42	0,035	0,000	
Aceleração(m/s ²)	0,082	0,000	0,034	0,094	0,000	0,0348	0,085	0,000	0,035	0,000	0,000	
Est. 1º Engate(ft)	19,38	0,00	9,61	38,12	0,00	19,12	75,89	0,00	37,80	0,00	0,00	
Est. 2º Engate(ft)	15,77	0,00	7,66	30,80	0,00	14,92	61,93	0,00	28,70	0,00	0,00	
Est.3º Engate(ft)	11,20	0,00	5,35	21,49	0,00	9,95	42,00	0,00	19,23	0,00	0,00	
Est. 4º Engate(ft)	7,62	0,00	2,67	11,48	0,00	4,98	23,30	0,00	9,80	0,00	0,00	
Est. 5º Engate(ft)	6,93	0,00	0,38	2,96	0,00	0,38	6,34	0,00	0,348	0,00	0,00	
Duração (s)	405			408			414					

Nota: nas Tabelas 7.9, 7.10 e 7.11 as expressões 1º Engate, 2º Engate, 3º Engate, 4º Engate e 5º Engate, indicam, respectivamente, engate posicionado após a última locomotiva, engate posicionado à ¼ do comprimento da composição, engate posicionado no meio da composição, engate posicionado à ¾ do comprimento da composição e último engate da composição.

Os esforços máximos de tração ocorridos nos engates, ao longo dos três tipos de trens, no procedimento de partida são mostrados na Figura 7.14.

regime. Considerando os resultados estatísticos apresentados na Tabela 7.10 e a Figura 7.15, é possível concluir que o traçado da velocidade em torno da velocidade típica foi mantido, apresentando maior variação para a composição longa, porém o valor médio resultante é ainda bastante satisfatório.

A Tabela 7.9 apresenta os principais resultados estatísticos para os três tipos de trens, curto, médio e longo, obtidos durante o procedimento de viagem em

7.1.3.2 Análise do procedimento de viagem em regime

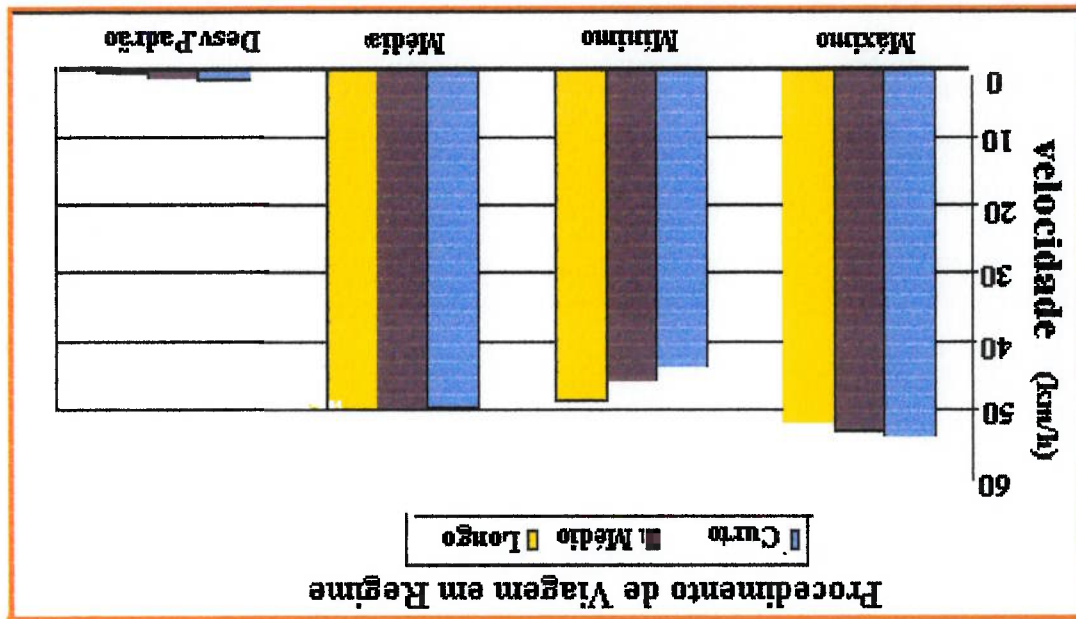
todos os engates. Como era esperado, para os três tipos de trens estudados, o maior esforço de tração ocorreu sempre no primeiro engate após a última locomotiva e quanto maior o comprimento da composição, maiores foram os esforços solicitados em

Figura 7.14 – Esforços Máximos de Tração



As Figuras 7.16, 7.17, 7.18 e 7.19 ilustram, respectivamente, os esforços máximos de tração, esforços máximos de compressão, valores médios e valores de RMS ("root mean square") para os três tipos de trens analisados.

Figura 7.15 – Resultados Estatísticos para Velocidade



Tipo de Composição		Curta			Média			Longa				
Varáveis	Max	Min	Média	D.P.	Max	Min	Média	D.P.	Max	Min	Média	D.P.
Velocidade(km/h)	53,47	43,50	49,24	2,02	52,67	45,36	49,60	1,52	51,46	48,36	50,08	0,82
Aceleração(m/s ²)	0,07	-0,09	0,00048	0,024	0,058	-0,063	0,00047	0,017	0,043	-0,036	-0,0004	0,011
Est. 1º Engate(t)	15,50	1,91	3,34	5,6	25,12	-51,7	6,65	12,78	35,63	-47,7	12,44	15,00
Est. 2º Engate(t)	16,65	-21,05	2,69	4,06	32,2	-67,13	5,22	10,63	37,56	-50,1	9,45	14,8
Est. 3º Engate(t)	24,17	-20,4	1,91	4,06	37,36	-79,7	3,5	9,85	32,7	-61,2	6,3	12,8
Est. 4º Engate(t)	33,30	-26,7	0,96	2,80	37,9	-86,9	1,74	6,84	19,6	-48,91	3,17	7,62
Est. 5º Engate (t)	42,15	-29,2	0,14	1,00	38,3	-79,5	0,137	1,68	22,9	-46,7	0,128	1,07
Duração (s)	563			568			551					

Tabela 7.10 Resultados Estatísticos - Procedimento de Viagem em Regime

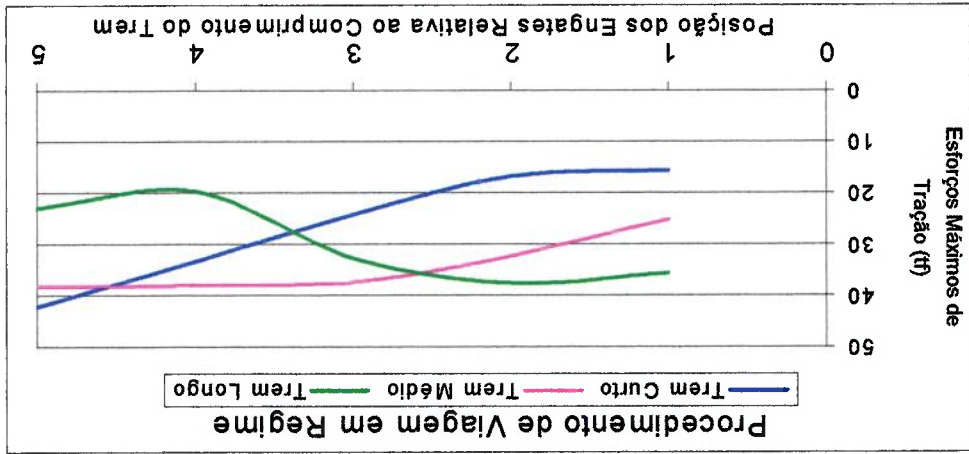


Figura 7.16 – Esforços Máximos de Tração nos Engates

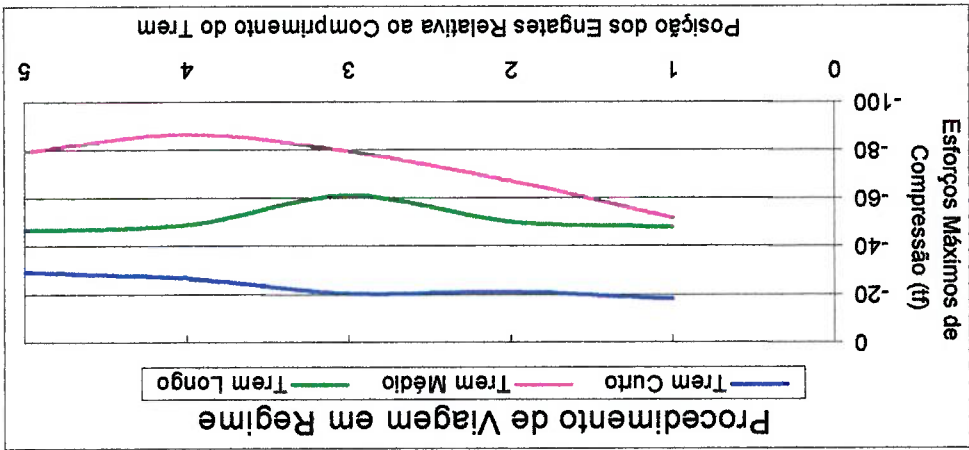


Figura 7.17 – Esforços Máximos de Compressão nos Engates

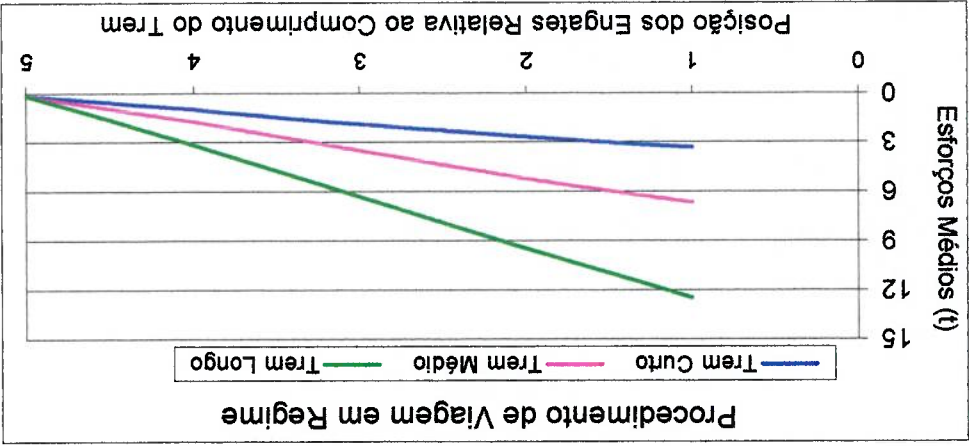


Figura 7.18 – Esforços Médios nos Engates

A Figura 7.20 mostra os esforços máximos de compressão para os três tipos de trens. Os valores dos esforços máximos de compressão, durante o

Análise da Parada		Tipo de Composição											
		Curta				Média				Longa			
Variáveis	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max
Duração(s)	104	112	158										
Velocidade (km/h)	51,00	0,00	42,81	50,99	0,00	40,97	51,01	0,00	-23,08				
Aceleração (m/s ²)	0,01	-0,872	-0,139	0,01	-0,774	-0,129	0,0003	-0,114	-0,068				
Est. 1º Engate (tf)	18,13	-22,10	-5,53	22,16	-48,07	-13,38	8,39	-84,00	-39,46				
Est. 2º Engate (tf)	4,06	-31,58	-6,57	8,06	-49,79	-15,92	0,00	-75,90	-30,45				
Est. 3º Engate (tf)	3,39	-34,31	-5,62	5,15	-48,77	-13,11	0,00	-75,80	-20,63				
Est. 4º Engate (tf)	1,87	-42,35	-3,23	3,06	-59,60	-7,48	0,00	-81,17	-10,60				
Est. 5º Engate (tf)	0,33	-45,38	-0,49	0,42	-58,80	-0,63	0,00	-42,58	-0,40				

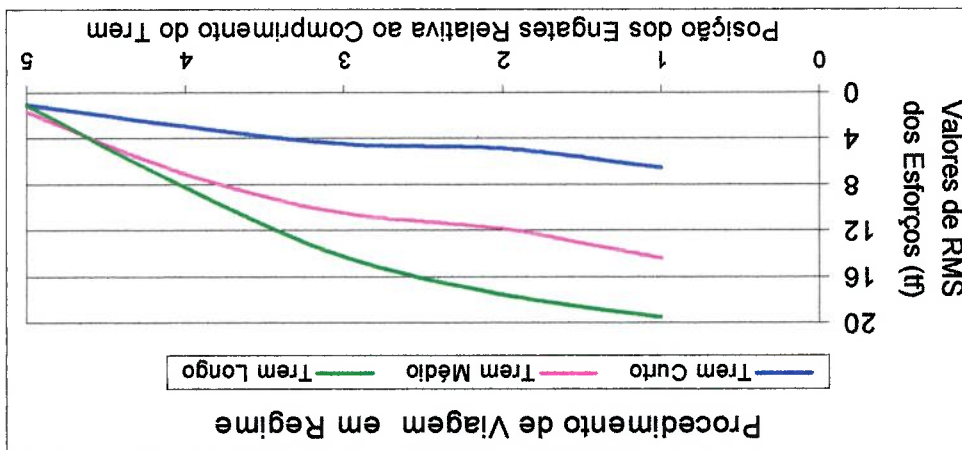
Tabela 7.11 - Resultados Estatísticos para Procedimento de Parada

na 7.11.

Os resultados estatísticos para o procedimento de parada estão apresentados

7.1.3.3 Análise do procedimento de parada

Figura 7.19 – Valores de RMS para os Esforços nos Engates



Observação: É interessante observar que o comportamento do controlador fuzzy, durante o procedimento de parada de trens longos é muito sensível à variação de parâmetros de projeto. Para exemplificar, a Tabela 7.13 mostra a influência que o parâmetro distância de parada, que corresponde à distância entre o ponto da via onde o procedimento de parada é inicializado e o ponto final de parada, exerce nos esforços máximos de compressão nos engates.

Tipo de Trem	Desaceleração (m/s ²)	Tempo de Parada (s)
Longo	0,070	192,0
Médio	0,129	112,0
Curto	0,139	104,0

Tabela 7.12 – Dados sobre a Parada

Figura 7.20 – Esforços Máximos de Compressão no Procedimento de Parada

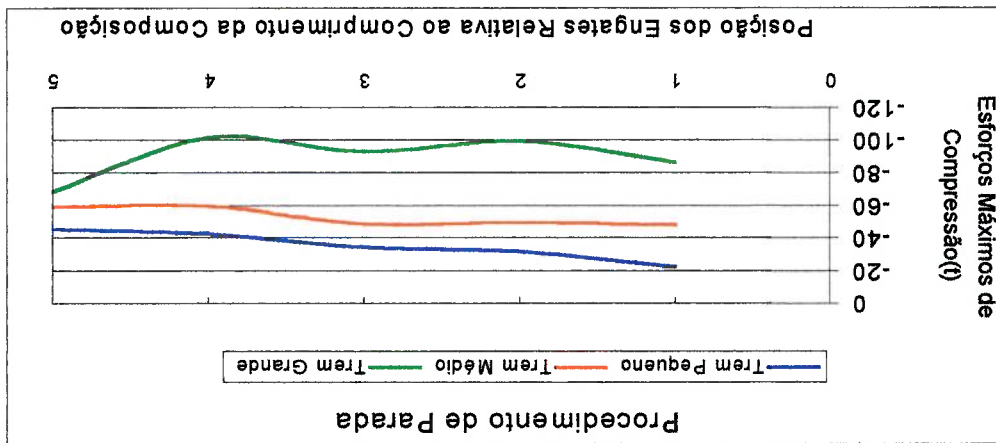


Tabela 7.12.

procedimento de parada, aumentaram em proporção ao tamanho do trem, sendo que os valores encontrados são satisfatórios. As taxas de desaceleração da composição e tempo de frenagem para o procedimento de parada, estão na

Distância de Parada (m)		Esforços nos Engates (t)	
1386	1286	1214	
1º Engate	-83,2	-84,0	-86,3
25º Engate	-68,7	-75,5	-85,1
50º Engate	-65,7	-75,8	-92,7
75º Engate	-55,8	-81,2	-101,3
100º Engate	-46,7	-46,7	-68,4

Tabela 7.13 – Influência da Distância de Parada nos Esforços dos Engates

7.2 Apresentação dos Resultados para um Trecho de Via Real

Neste tópico, é considerado como entrada do sistema um trecho de via real, cujos dados foram fornecidos na Tabela 7.2.

Nas simulações, considerando como entrada um trecho de via real, foram registradas as seguintes variáveis do sistema:

- > velocidade da locomotiva líder (km/h);
- > ponto de tração/ porcentagem de freio dinâmico;
- > aceleração longitudinal média da composição (m/s^2);
- > forças no 1º engate após a última locomotiva (tf);
- > forças no engate posicionado no meio da composição (tf);
- > forças no último engate da composição (tf);

7.2.1 Análise do comportamento dinâmico global da composição

Para a análise do comportamento dinâmico global da composição, ao longo de toda a viagem, englobando os procedimentos de partida, viagem em regime e parada, foi considerada a mesma composição típica, analisada para a via padrão, composta de 1 locomotiva e 20 vagões com carga bruta por vagão de 100.000kg.

As séries temporais das variáveis registradas durante esta simulação, estão ilustradas no ANEXO A e compreendem as Figuras de A.49 à A.54.

7.2.1.1 Análise do procedimento de partida

Considerando a Figura 7.21, que ilustra o comportamento dos esforços máximos de tração ao longo do comprimento do trem, é possível afirmar que o procedimento de partida foi bem conduzido, pois os esforços máximos de tração nos engates foram mantidos relativamente pequenos. O máximo valor ocorreu no primeiro engate após a locomotiva e foi de 23,53tf. O valor médio, para este mesmo engate, foi de 8,36tf.

A aceleração manteve-se baixa, o valor médio foi de 0,032m/s² e o valor máximo foi de 0,102m/s².

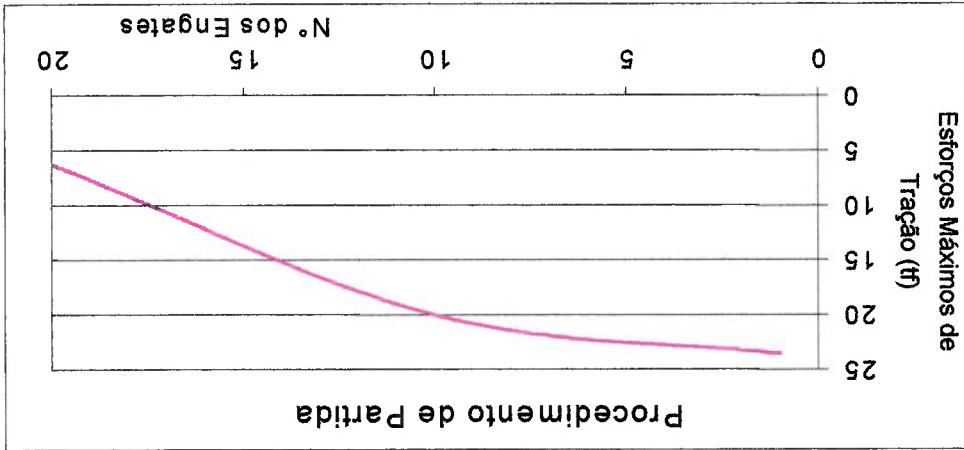


Figura 7.21 – Esforços Máximos de Tração nos Engates

7.2.1.2 Análise do procedimento de viagem em regime

Analisando os resultados da simulação, quanto ao comportamento do controlador fuzzy, é possível afirmar que:

a) a minimização dos esforços nos engates foi satisfeita. Analisando os resultados, apresentados pela Figura 7.22, é possível verificar que tanto os esforços máximos de tração como os esforços máximos de compressão foram mantidos dentro de uma faixa de valores aceitáveis. É importante ressaltar que os valores médios foram mantidos em valores baixos, da mesma forma que os valores de RMS ("root" mean square), indicando que há pouca energia associada a esses movimentos;

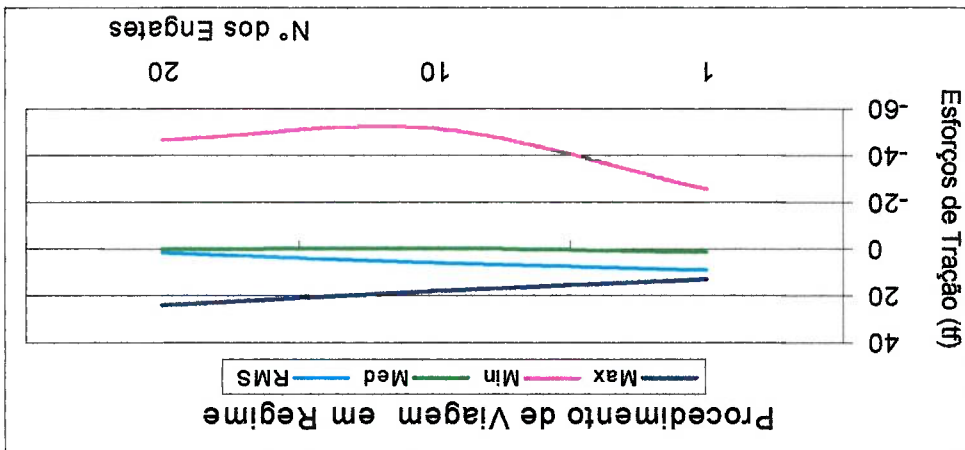


Figura 7.22 – Resultados para o Procedimento de Viagem em Regime

b) analisando a Figura A.49 é possível concluir que o traçado da velocidade está satisfatório, pois o valor médio, durante o procedimento de viagem em regime foi de 47,68km/h, para uma velocidade típica de 50,00km/h, atingindo o valor máximo de 55,43km/h, e o valor mínimo de 31,40km/h;

c) o freio pneumático não foi utilizado durante o procedimento de viagem em regime, indicando uma boa operação;

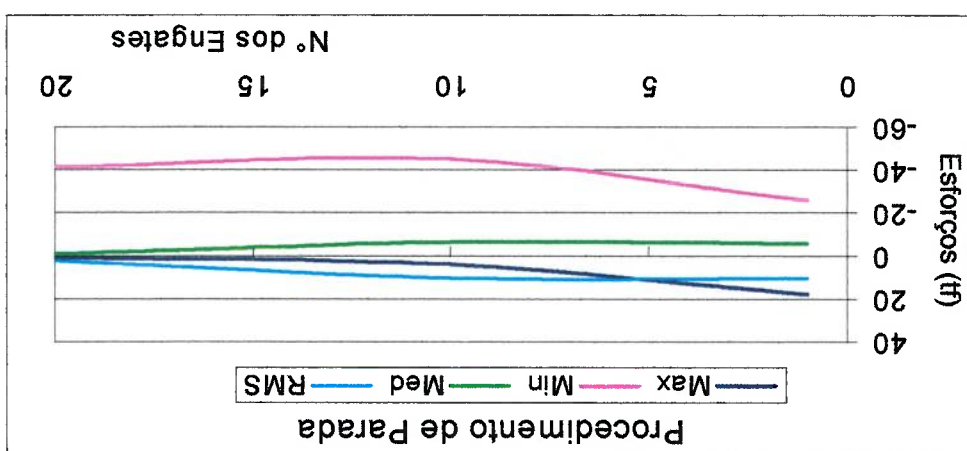
d) o tempo de percurso ótimo é de 1204s e o tempo totalizado na simulação foi de 1263s.

Para avaliar o comportamento do controlador fuzzy, quanto à variação do carregamento dos vagões do trem, foram realizadas três simulações utilizando

do carregamento dos vagões do trem

7.2.2 Análise do comportamento do controlador fuzzy quanto à variação

Figura 7.23 - Esforços nos Engates no Procedimento de Parada



minimizando os esforços de compressão.

do meio para o fim do trem, indicando que o controlador agiu corretamente,

Por outro lado, os valores de RMS ("root mean square") tendem a diminuir

confirmando um comportamento que sempre ocorre em testes de campo.

compressão atingem valores mais significativos do meio para o fim do trem,

b) pela Figura 7.23, é possível verificar que os esforços máximos de

a) a taxa de desaceleração foi de $0,170\text{m/s}^2$;

Analisando o procedimento de parada é possível verificar que:

7.2.1.3 Análise do procedimento de parada

um mesmo trem típico, composto de uma locomotiva e 20 vagões carregados. O peso bruto de cada vagão variou conforme indicado na Tabela 7.14.

Tipo de Trem	Peso Vagão(kg)
Leve	50.000
Médio	80.000
Pesado	120.000

Tabela 7.14 – Peso Bruto dos Vagões

As séries temporais resultantes das simulações encontram-se no ANEXO A, sendo que as Figuras de A.55 a A.60 correspondem ao trem leve, as Figuras de A.61 a A.66 correspondem ao trem médio e as Figuras de A.67 a A.72 correspondem ao trem pesado.

7.2.2.1 Análise do procedimento de partida

Na Tabela 7.15 estão os principais resultados estatísticos do procedimento de partida, para os três tipos de carregamentos considerados: leve, médio e pesado.

Tabela 7.15 – Resultados Estatísticos para o Procedimento de Partida

Análise da Partida		Tipo de Composição									
		Leve			Média			Pesada			
Variáveis	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min
	Velocidade(km/h)	50,01	0,00	21,95	50,00	0,00	22,80	50,00	0,00	18,05	0,00
Aceleração(m/s ²)	0,182	0,000	0,0617	0,126	0,000	0,0378	0,086	0,000	0,026	0,000	0,000
Est. 1º Engate (tf)	20,39	0,00	7,89	23,20	0,00	7,93	23,75	0,00	8,25	0,00	0,00
Est. 10º Engate(tf)	12,40	0,00	4,32	13,65	0,00	4,38	13,66	0,00	4,53	0,00	0,00
Est. 20º Engate(tf)	6,08	0,00	0,40	6,09	0,00	0,41	7,44	0,00	0,42	0,00	0,00
Duração (s)	225			370			528				

A Figura 7.24 mostra os esforços máximos de tração, ocorridos ao longo da composição, para os três tipos de carregamentos considerados. Como era esperado, o maior esforço de tração ocorreu sempre no primeiro engate após a locomotiva. Os valores máximos encontrados foram 20,39tf, 23,20tf e 23,75tf, respectivamente para os trens leve, médio e pesado. Apesar da diferença de carga entre os vagões do trem leve e do trem pesado ter sido de 70.000kg, a diferença no esforço máximo de tração registrada foi de 3,36tf.

Nesta situação, é importante ressaltar que o controlador fuzzy trabalhou no sentido de atenuar os esforços de tração durante o procedimento de partida, fazendo com que a composição pesada fosse inicializada de forma mais lenta, levando 225 s, enquanto que a composição pesada levou 528 s.

Considerando os resultados estatísticos da Tabela 7.16 e os apresentados na Figura 7.25, é possível concluir que o traçado da velocidade em torno da

Tipo de Composição													
Leve				Média				Pesada					
Max		Min		Média		Min		Média		Min			
DP		Média		DP		Max		Média		DP			
Velocidade(km/h)		52,10	39,80	49,37	1,88	51,06	33,40	48,21	3,45	58,20	27,20	47,36	6,18
Aceleração(m/s ²)		1,1E-02	-0,124	2,E-04		0,094	-0,970	1,E-04		0,086	-0,107	0,0	
Estf.1° Engate(tf)		10,87	-17,20	-0,02	4,94	12,12	-20,50	-0,70	7,33	14,70	-28,74	0,21	8,45
Estf.10° Engate(tf)		14,32	-16,70	0,01	3,05	16,18	-23,84	-0,37	4,62	20,34	-41,00	0,22	5,65
Estf.20° Engate(tf)		21,35	-22,90	0,01	0,64	21,92	-44,20	-0,03	1,01	30,36	-49,89	0,03	1,27
Duração (s)		1305				1258				1251			

Regime

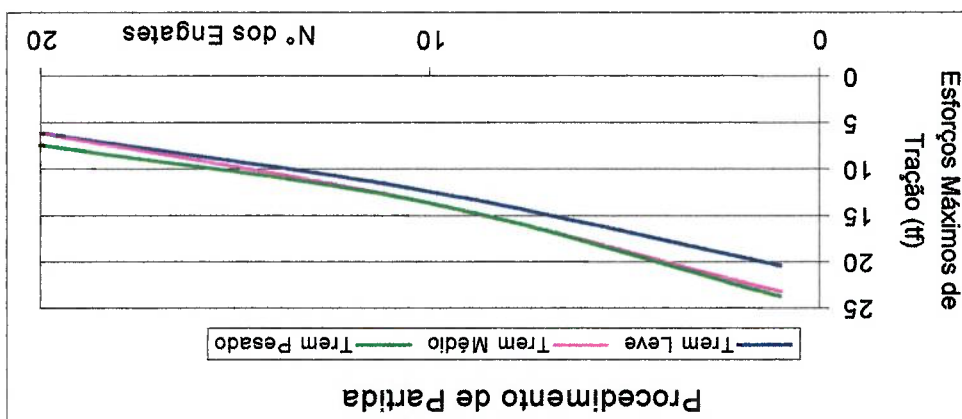
Tabela 7.16 Resultados Estatísticos para o Procedimento de Viagem em

leve, médio e pesado, durante o procedimento de viagem em regime.

A Tabela 7.16 apresenta os principais resultados estatísticos para os trens

7.2.2.2 Análise do procedimento de viagem em regime

Figura 7.24 - Esforços Máximos de Tração



velocidade típica foi mantido, apresentando maior variação para a composição pesada, tendo, contudo, para este caso, um valor médio resultante satisfatório.

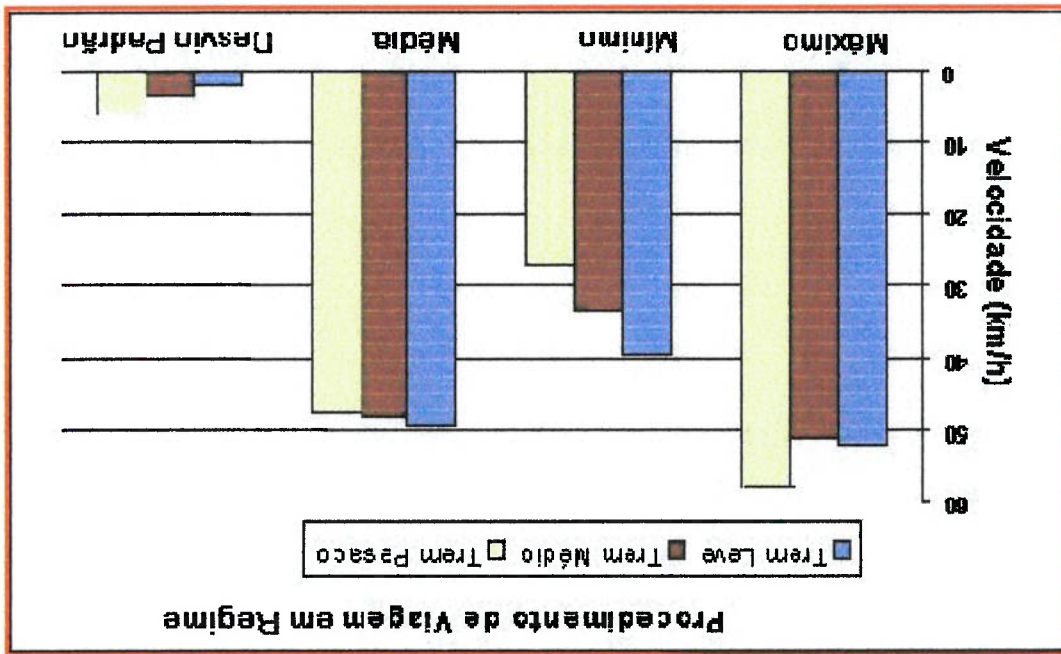


Figura 7.25 – Resultados Estatísticos para Velocidade

As Figuras 7.26, 7.27 e 7.28 ilustram, respectivamente, os esforços máximos de tração, de compressão e os esforços médios para os três tipos de trem analisados. Novamente, os maiores esforços ocorreram nos engates do trem pesado, sendo que os valores encontrados estão coerentes com os valores registrados em ensaios de campo.

Figura 7.28 – Valores Médios e Desvios Padrão para os Esforços dos Engates

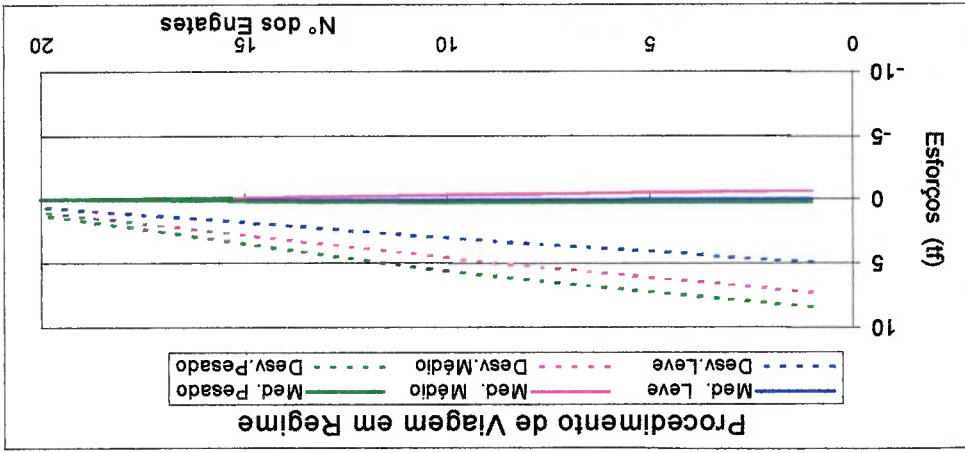


Figura 7.27 – Esforços Máximos de Compressão

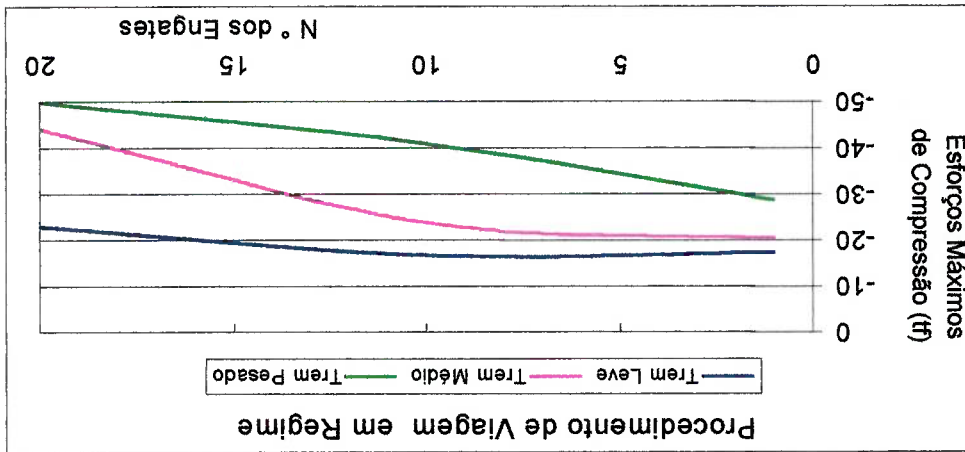
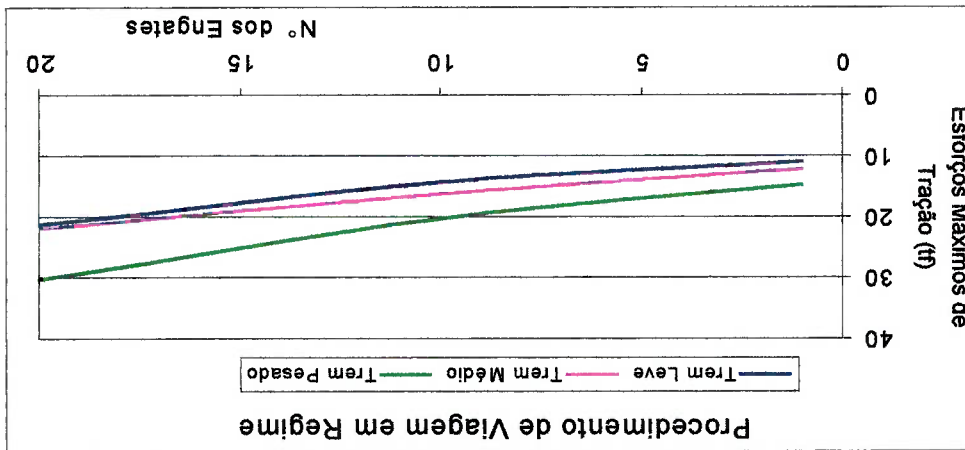


Figura 7.26 – Esforços Máximos de Tração nos Engates



7.2.2.3 Análise do procedimento de parada

A Tabela 7.17 apresenta os principais resultados estatísticos obtidos para o procedimento de parada.

Tabela 7.17 - Resultados Estatísticos para o Procedimento de Parada

Análise da Parada		Tipo de Composição											
		Leve				Média				Pesada			
Variáveis	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max	Min	Média	Max
Velocidade(km/h)	50,89	0,00	37,29	50,78	0,00	39,13	47,53	0,00	32,23				
Aceleração(m/s ²)	-0,0004	-0,951	-0,224	0,005	-0,87	-0,199	0,009	-0,687	-0,147				
Est. 1º Engate (tf)	16,93	-20,33	-7,8	17,65	-22,89	7,72	15,92	-23,4	-7,2				
Est. 10º Engate (tf)	1,16	-26,59	-6,27	2,19	-32,09	-7,03	4,74	-37,62	-6,38				
Est. 20º Engate (tf)	0,145	-34,15	-0,68	0,42	-35,77	-0,758	2,19	-55,00	-0,713				
Duração (s)			70			74			89				

A Figura 7.29 ilustra os esforços máximos de compressão para cada tipo de composição obtidos durante uma frenagem para o procedimento de parada. Esses resultados coincidem com os resultados obtidos em ensaios reais, apresentando os maiores esforços de compressão do meio para o fim da composição.

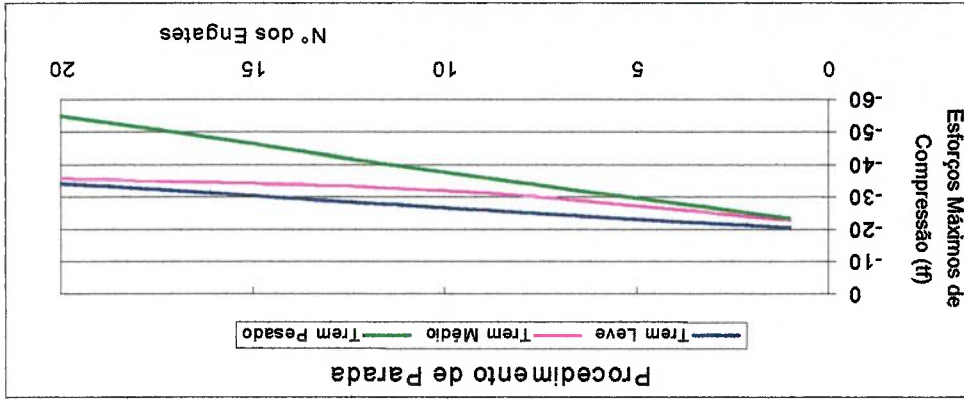


Figura 7.29 – Esforços de Compressão no Procedimento de Parada

A taxa de desaceleração e o tempo de parada para cada um dos tipos de composição é dado pela Tabela 7.18.

Tabela 7.18 – Dados do Procedimento de Parada

Tipo de Composição	Desaceleração (m/s ²)	Tempo de Parada (s)
Leve	-0,202	70
Média	-0,199	74
Pesada	-0,148	89

8. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O controlador fuzzy para conduzir composições ferroviárias foi desenvolvido utilizando algoritmos de controle, baseados em lógica fuzzy e expressos em forma linguística. Este tipo de algoritmo mostrou ser uma ferramenta de inteligência Artificial bastante eficiente para controlar sistemas complexos, não-lineares e, principalmente, difíceis de serem modelados através de técnicas tradicionais de equações diferenciais.

Apesar da planta física, que representa a dinâmica longitudinal de uma composição ferroviária, apresentar grandes dificuldades para ser operada manualmente foi possível controlá-la por meio de um "software" heurístico adequado ao problema.

O programa de computação desenvolvido foi relativamente simples de ser elaborado. Na fase de concepção, contudo, o projeto do controlador apresentou as seguintes dificuldades:

- captura e tradução do conhecimento de especialistas, expresso em forma linguística, em regras procedurais fuzzy da forma "IF-ELSE", de modo a não perder informações importantes na transformação de uma informação qualitativa em quantitativa;
- garantia da integridade do controlador, tanto no espaço das entradas, como no espaço das saídas;

- definição adequada de conjuntos fuzzy para representar as variáveis de entrada do controlador. A construção dos conjuntos fuzzy utilizou informações de maquinistas experientes e conceitos básicos de engenharia de operação ferroviária, de forma, que para cada elemento x do conjunto fuzzy X , foi atribuído um grau de pertinência, que melhor capturasse o significado do termo linguístico representado;

- no processo de avaliação das decisões que devem ser tomadas, a abordagem adotada é a de inferência local, ou seja, cada uma das regras é inferida separadamente e os resultados das inferências individuais são agrupados “a posteriori”. Na prática, a *premissa* das regras foram ajustadas de acordo com os dados disponíveis e, a seguir, em função da avaliação das premissas observadas, os *consequentes* foram modificados adequadamente.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o desempenho do controlador, de forma geral, foi satisfatório nos três tipos de procedimentos de viagem em regime e de parada. Considerando os exemplos apresentados na Capítulo 7, resultados de diversos tipos de simulações, onde variou-se as configurações dos trens, do carregamento e o perfil via, é possível afirmar, que, de uma forma geral, a operação ferroviária conduzida pelo controlador fuzzy foi similar à operação humana, porém, otimizada nos procedimentos de partida, de parada e de viagem em regime, principalmente nos trechos de via com perfil topográfico crítico.

No procedimento de *viagem em regime*, os índices de desempenho que devem ser satisfeitos são: garantia de viagem, otimização do tráfego da velocidade, minimização dos esforços nos engates e otimização do tempo de viagem ou consumo de combustível. De todos os índices acima citados, a prioridade é garantir a segurança da composição, o que significa basicamente que o trem não pode ultrapassar a velocidade limite do bloco de via em que se encontra. Sempre que a velocidade limite for ultrapassada, uma atitude de redução de velocidade adequada deve ser selecionada, independente do tempo decorrido desde a última alteração de ponto de tráfego/treio dinâmico. Como consequência desta atitude, podem ocorrer esforços de compressão, penalizando, assim, o índice de minimização dos esforços nos engates. Esta é a justificativa para a ocorrência, na maioria dos casos simulados, de esforços de compressão nos engates mais severos que esforços de tráfego. O aumento dos esforços de tráfego nos engates são causados pelos processos de

necessários para começar a movimentar a composição.

composição registradas foram sempre proporcionais aos esforços de tráfego deslocando cada vagão individualmente. As taxas médias de aceleração da composição registradas foram sempre proporcionais aos esforços de tráfego através do processo de inicialização do movimento da composição que foi interessante observar o desempenho do controlador neste procedimento, valores registrados em testes de campo, utilizando operação manual. E apresentou o maior esforço de tráfego, porém, com valores inferiores aos todos os casos simulados. O primeiro engate após a última locomotiva sempre carregamento ou via, a minimização dos esforços de tráfego foi garantida em *No procedimento de partida*, independente da configuração de trem, do tipo de

aceleração (aumentar a velocidade) da composição, o que é realizado para otimizar o tempo de percurso e/ou otimizar o traçado da velocidade. Porém, este tipo de atitude só é tomada se houver condição favorável (tempo desde a última mudança de ponto estiver bom) para que isso ocorra, justificando a minimização dos esforços de tração. A faixa dinâmica da variação dos esforços nos engates, para todos os tipos de carregamento e via testados, cresce sempre do meio para o fim da composição, com seus respectivos valores médios ficando em torno de zero, o que é adequado.

Considerando, ainda, o procedimento de viagem em regime e analisando a traçabilidade da velocidade, é possível concluir:

– quanto à variação do comprimento da composição os erros da velocidade média registrados foram 1,5%, 0,8% e 0,2% para as composições curta, média e longa, respectivamente;

– quanto à variação do carregamento da composição, para a via real, os erros obtidos para a velocidade média foram 1,2%, 3,6% e 5,3%, respectivamente, para as composições leve, média e pesada.

No procedimento de parada, o índice de desempenho a ser otimizado é a minimização dos esforços de compressão nos engates. Considerando composições com diferentes carregamentos e para diferentes perfis de via é possível afirmar que:

– em geral, as forças de compressão crescem do início para o fim do trem. Para melhor exemplificar, consideremos o caso em que há variação de carregamento da composição típica. A diferença entre a maior força de

compressão registrada para a composição leve e para a pesada, no caso da via padrão, foi de 2,00tf, sendo que, para a composição leve, a força foi de 47,00tf e para a pesada foi de 49,00tf. Este fato é resultante da ação do controlador sobre o processo de frenagem, que leva em conta a energia cinética do trem, para avaliar a distância necessária para parar a composição de forma a minimizar os esforços de compressão nos engates. Neste caso particular, os tempos gastos no procedimento de parada foram de 65s, 72s e 85s, respectivamente, para os trens leve, médio e pesado. As taxas de desaceleração foram respectivamente: 0,216m/s², 0,201m/s² e 0,165m/s².

– Comportamento similar ao descrito acima é observado quando varia-se o comprimento da composição. As forças de compressão tendem a ficar maiores do meio para o fim da composição. As taxas médias de desaceleração encontradas para este caso foram 0,139m/s², 0,129m/s² e 0,114m/s², respectivamente para as composições curta, média e longa.

Até o presente momento não foi possível encontrar dados resultantes de operação automática convencional para composição ferroviária de carga, em estudo. Desse modo fica difícil fazer comparações entre os dados resultantes do controlador fuzzy com dados procedentes de uma operação automática. Porém, é importante ressaltar que tanto a implementação quanto a calibração de um controlador fuzzy são muito mais fáceis de serem realizadas do que em um controlador convencional, dada a simplicidade da tarefa de alteração de uma regra de controle que gerou um resultado incorreto: basta modificar um simples comando "if-else".

funcionamento do controlador fuzzy:

Como sugestões de trabalhos futuros, no sentido de aperfeiçoar o

implementação viável em um microcomputador.

espaço utilizado para armazenagem de dados é pequeno, tornando sua

abordagem é que a decisão é calculada em centésimos de segundos, o

um conjunto de regras lógicas. A principal vantagem desse tipo de

– cada um dos algoritmos desenvolvidos funciona como um interpretador de

regras existentes;

como de configuração de composição, forem adicionadas ao conjunto de

otimizado se regras particularizadas, para situações específicas, tanto de via

tem. Observou-se que devido à sua sensibilidade, o controlador pode ser

regras, independente do perfil de via, da configuração ou carregamento do

– o conjunto de todos os resultados foi obtido por um mesmo conjunto de

de controle programadas;

– o controlador projetado mostrou grande sensibilidade à variação das regras

viável e este tipo de solução deve ser buscado sempre que necessário;

– aplicar técnicas de raciocínio para derivar controladores fuzzy é totalmente

muito melhor;

controlador é ainda muito grande, indicando que o desempenho pode ser

– a quantidade de informações adicionais que podem ser incorporadas ao

totalmente aceitáveis;

do conhecimento de operação ferroviária e os resultados apresentados são

– no projeto do controlador fuzzy foi incorporada apenas uma pequena parte

Concluindo é possível afirmar que:

- para ajustar o controlador fuzzy, sugere-se mantê-lo monitorado e registrando cada resultado obtido e a regra ou conjunto de regras que o gerou,
- utilização de um controlador preditivo fuzzy, o qual deverá escolher a melhor opção de controle, a partir de um conjunto de comandos de controle candidatos. A escolha será feita a partir da avaliação do estado e das funções objetivos de controle do sistema dinâmico.

ANEXO A

- ⇒ **Tipo de Via:** Padrão
- ⇒ **Tipo de Análise:** Comportamento do Controlador Fuzzy quanto à Variação do Carregamento dos Vagões da Composição
- ⇒ **Configurações da Composição:**
 - Leve: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto de cada vagão de 50.000kg, e correspondendo às Figuras de A.1 à A.8;
 - Média: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto de cada vagão de 70.000kg, e correspondendo às Figuras de A.9 à A.16;
 - Pesada: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto de cada vagão de 110.000kg, e correspondendo às Figuras de A.17 à A.24.

Resultados para Trem com Carregamento Leve

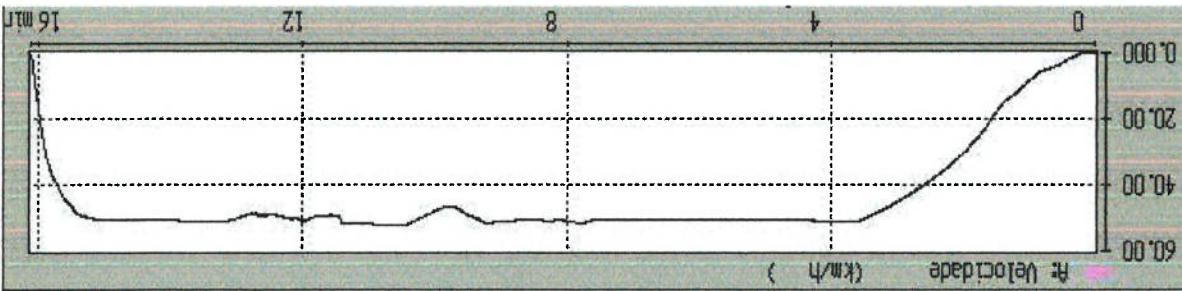


Figura A.1 - Velocidade da Composição

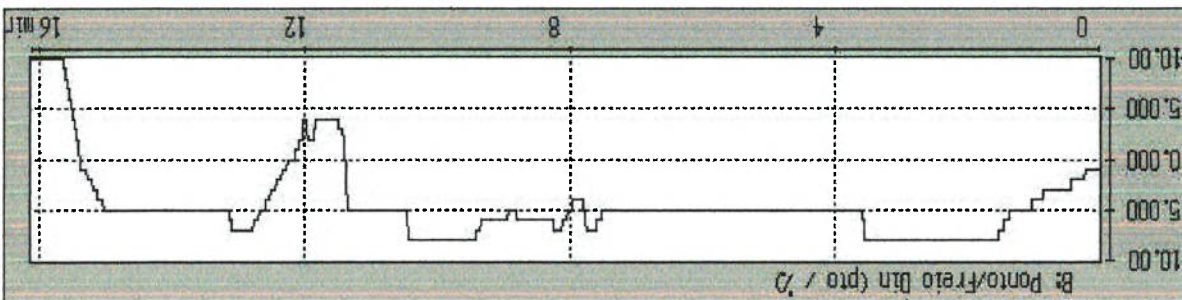


Figura A.2 - Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

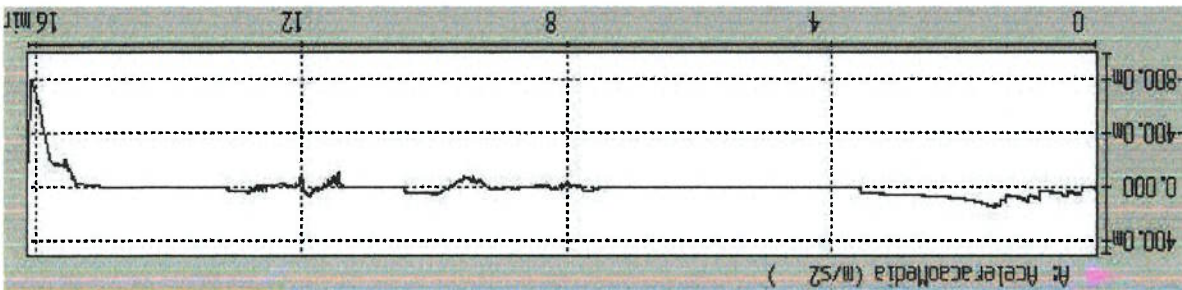


Figura A.3 - Aceleração Média da Composição

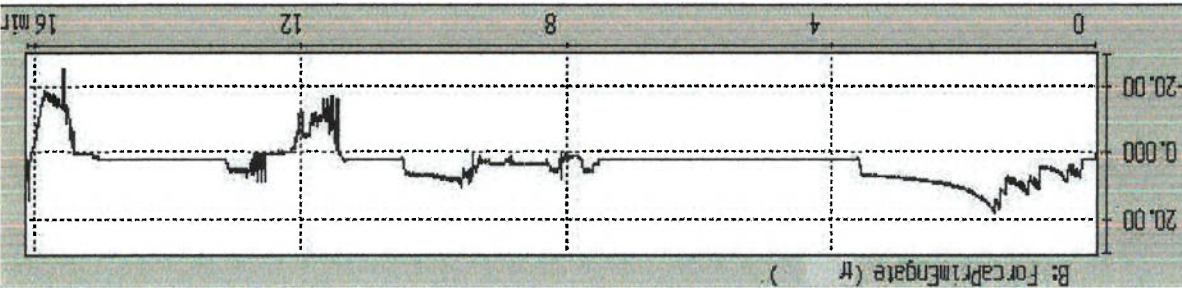


Figura A.4 - Esforço no 1º Engate da Composição

Figura A.8 – Esforço no 20° Engate da Composição

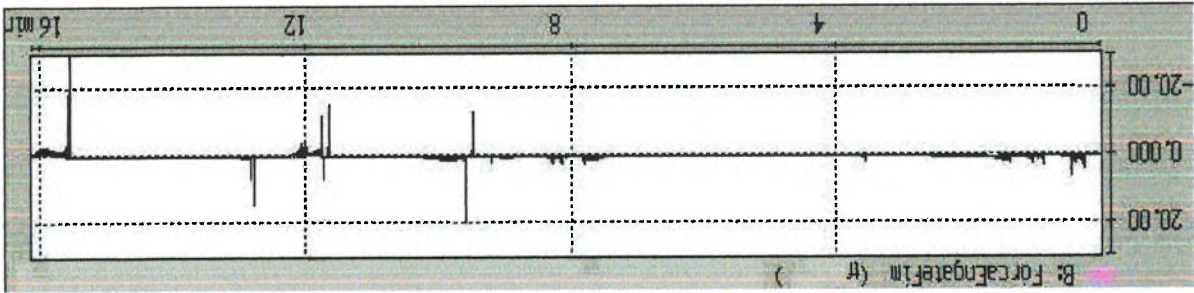


Figura A.7 – Esforço no 15° Engate da Composição

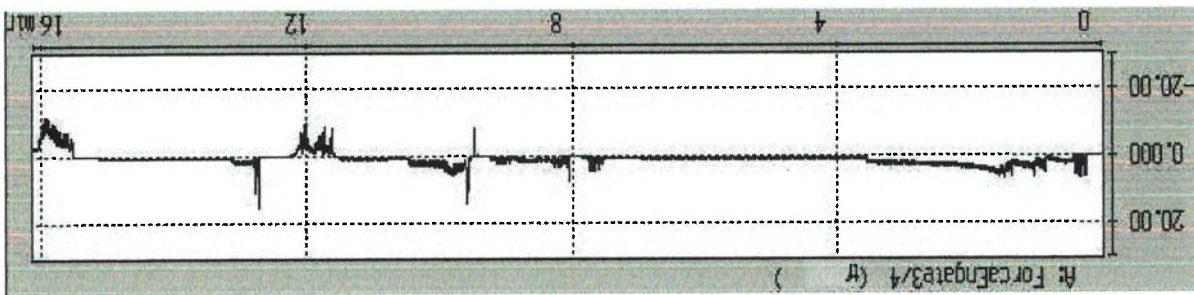


Figura A.6 – Esforço no 10° Engate da Composição

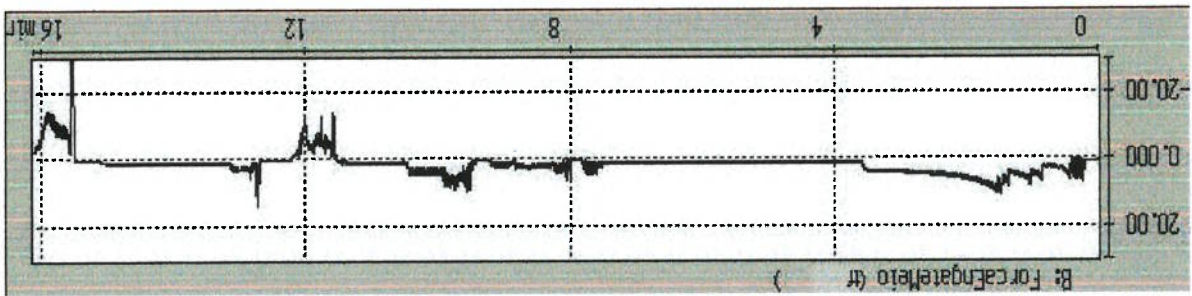
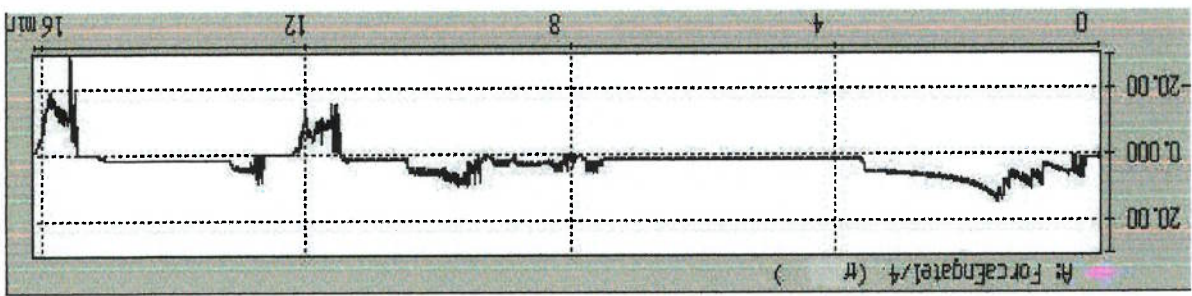


Figura A.5 – Esforço no 5° Engate da Composição



Resultados para o Trem com Carregamento Médio

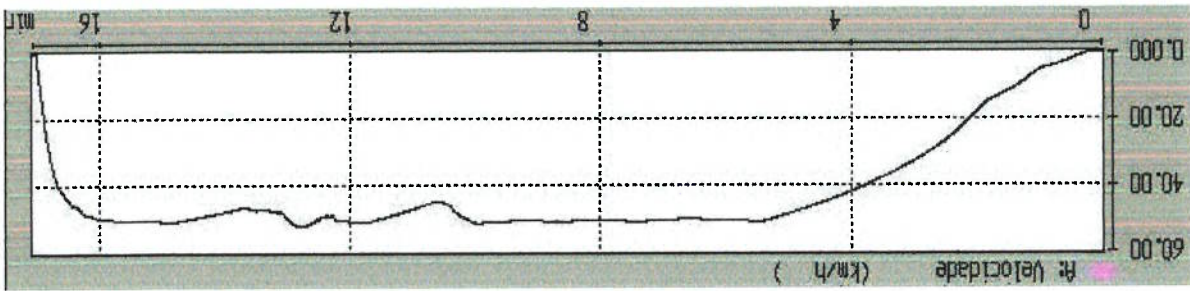


Figura A.9 - Velocidade da Composição

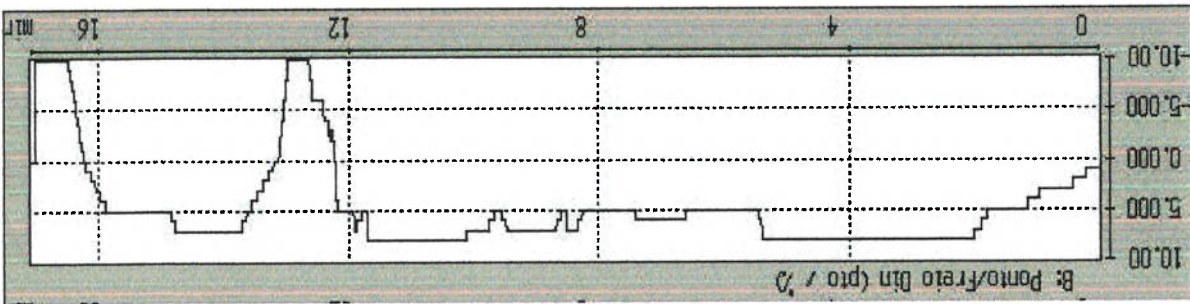


Figura A.10 - Ponto de Tração / Proporção do Freio Dinâmico

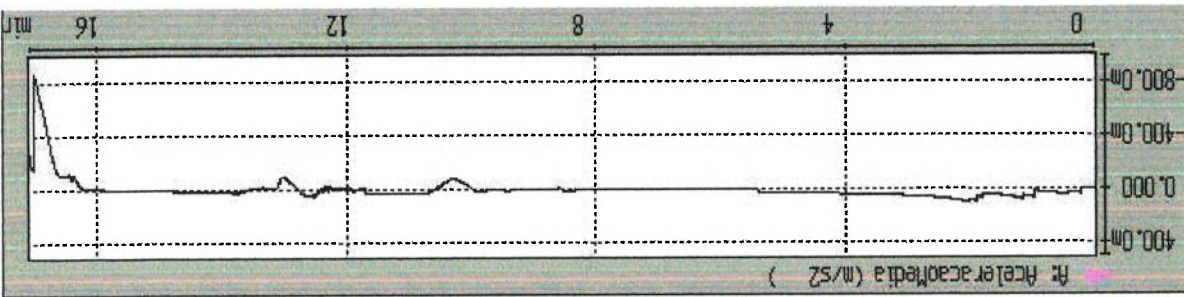


Figura A.11 - Aceleração Média da Composição

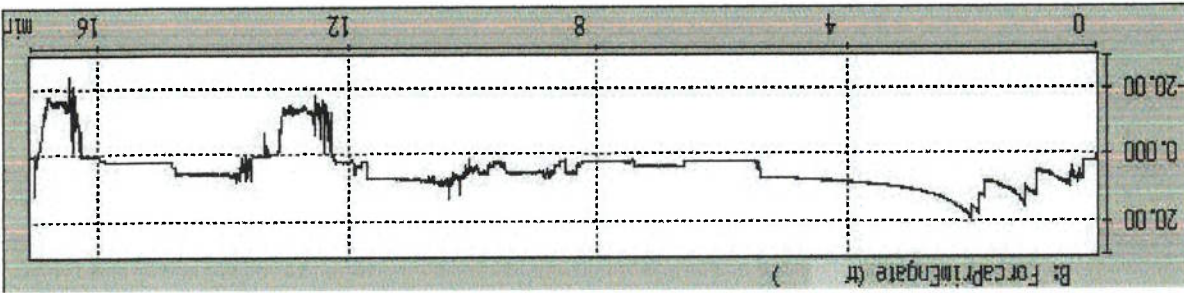


Figura A.12 - Esforço no 1º Engate da Composição

Figura A.16 – Esforço no Último Engate da Composição

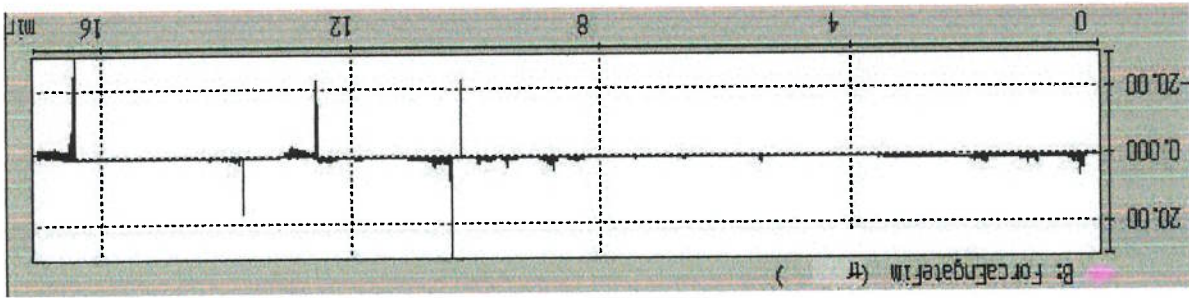


Figura A.15 – Esforço no 15º Engate da Composição

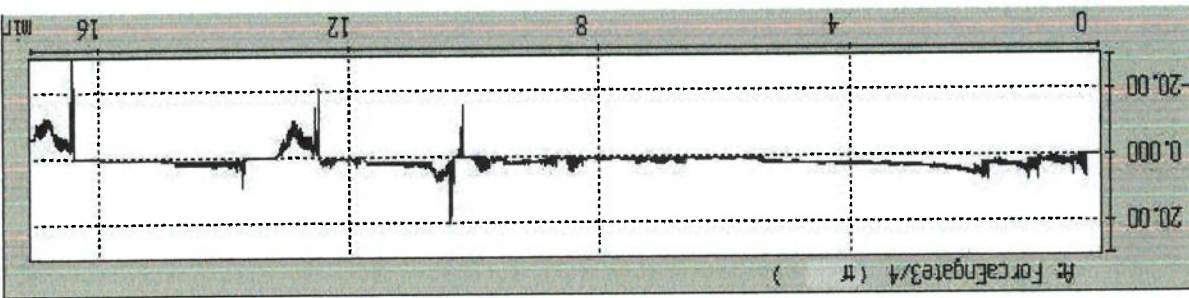


Figura A.14 – Esforço no 10º Engate da Composição

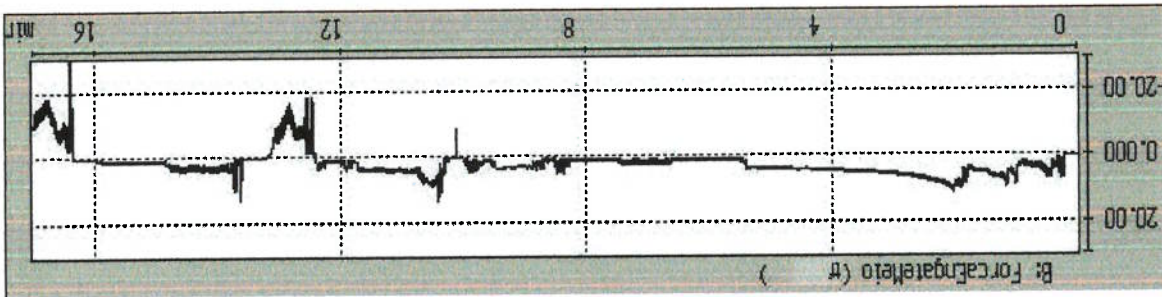
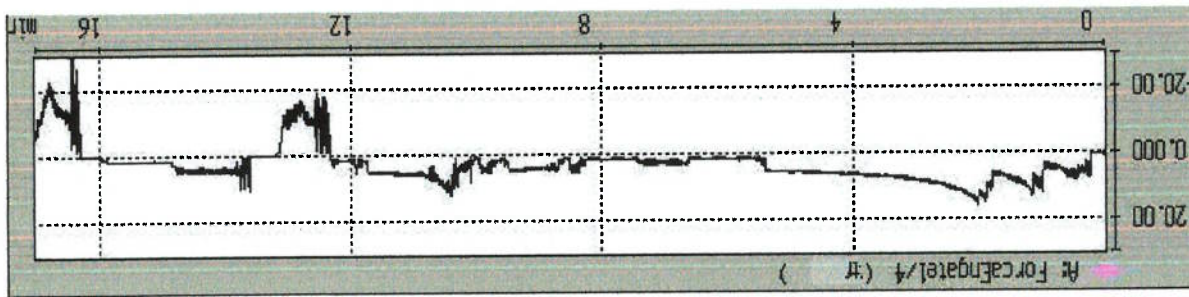


Figura A.13 – Esforço no 5º Engate da Composição



Resultados para o Trem com Carregamento Pesado

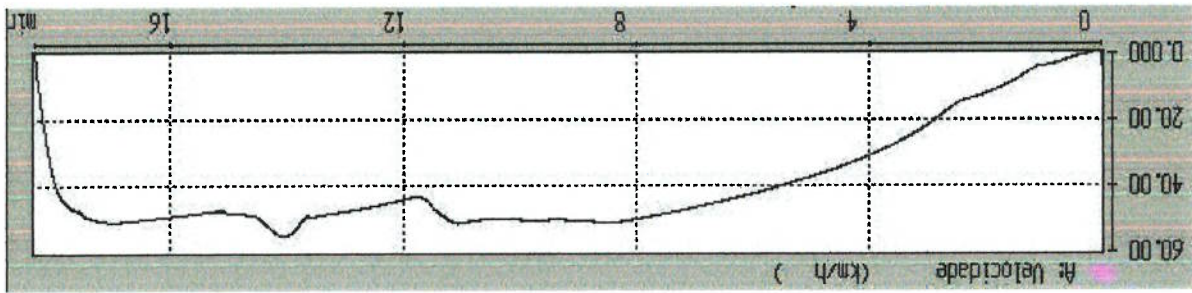


Figura A.17 – Velocidade da Composição

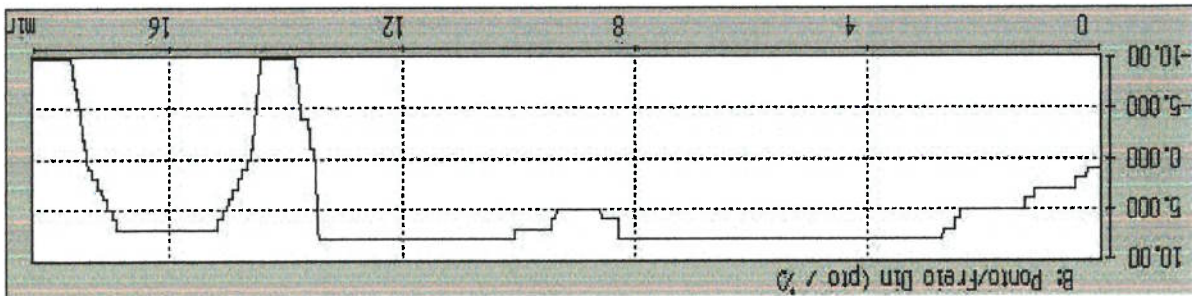


Figura A.18 – Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

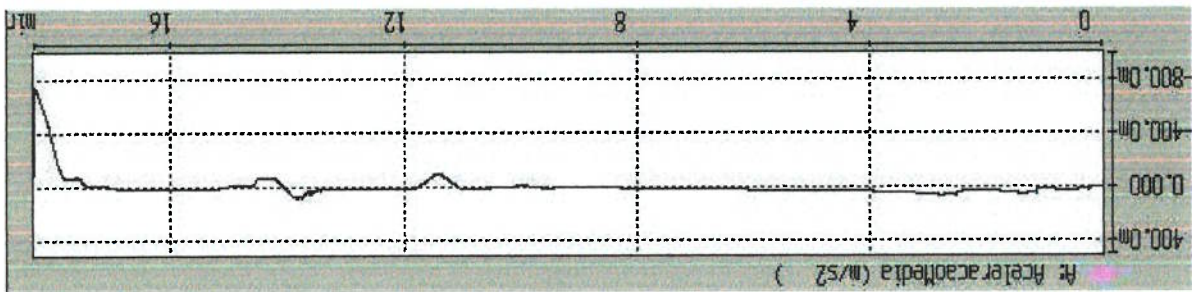


Figura A.19 – Aceleração Média da Composição

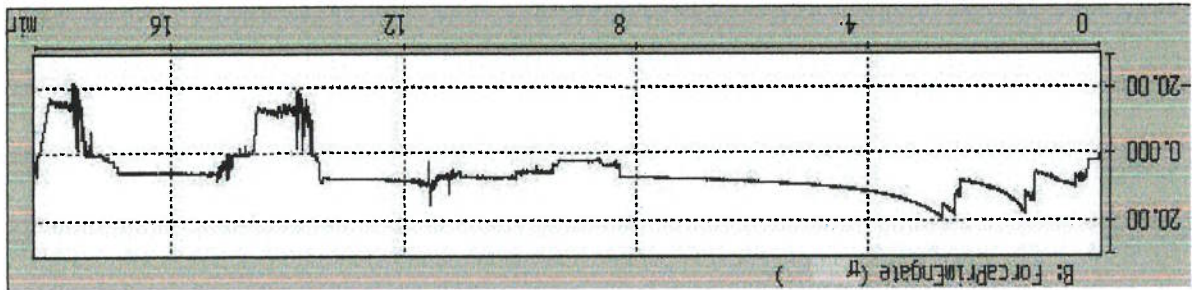


Figura A.20 – Esforço no 1º Engate da Composição

Figura A.24 – Esforço no Último Engate da Composição

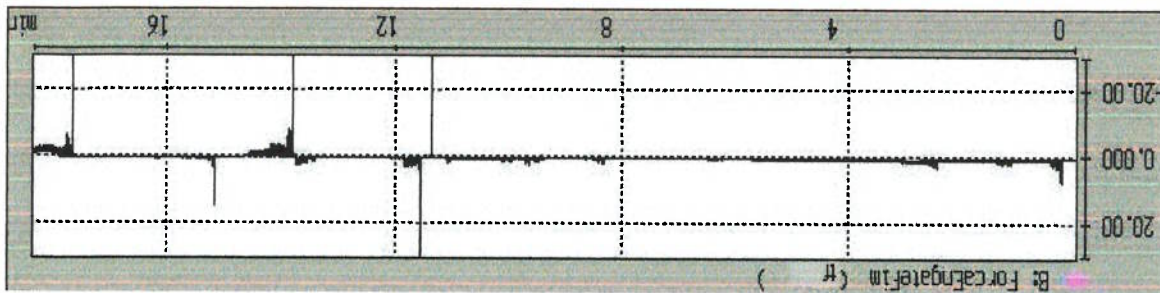


Figura A.23 – Esforço no 15º Engate da Composição

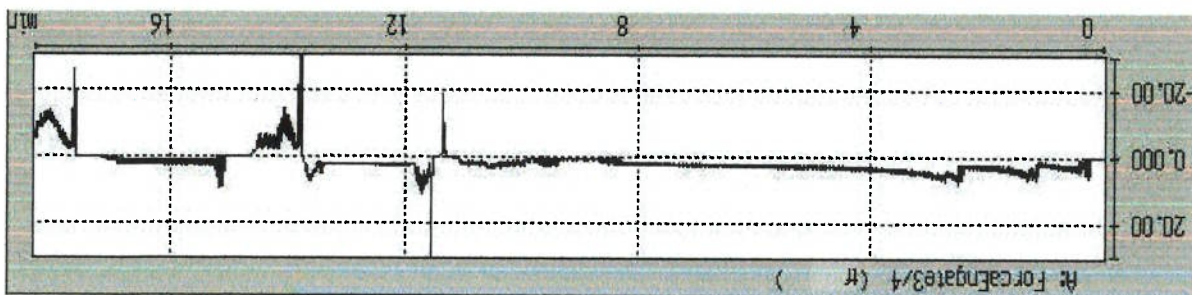


Figura A.22 – Esforço no 10º Engate da Composição

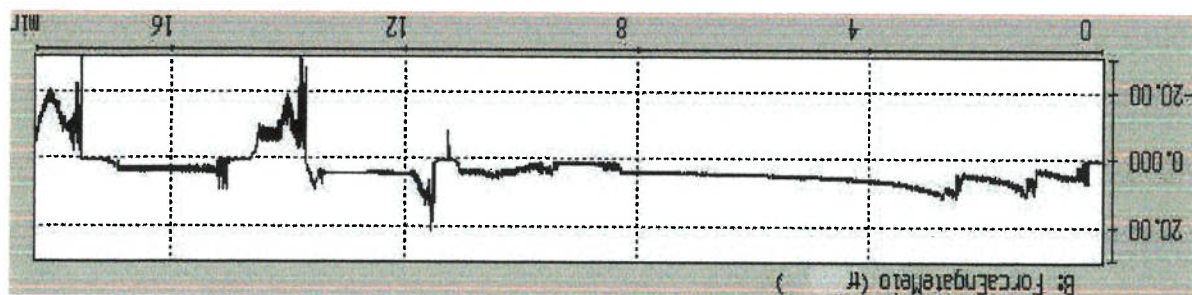
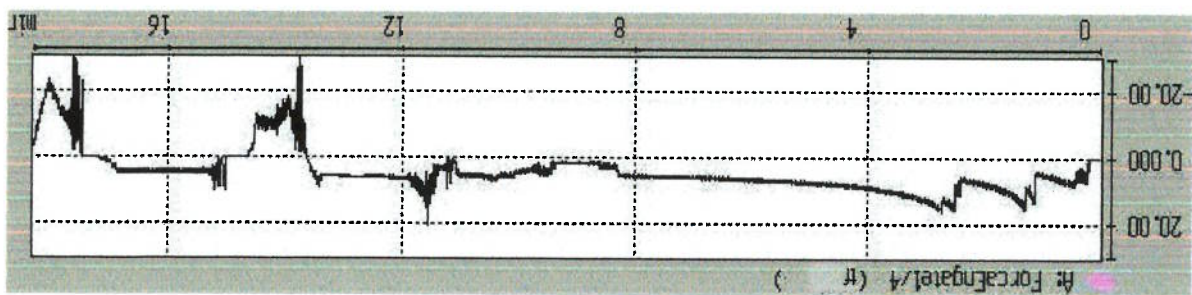


Figura A.21 – Esforço no 5º Engate da Composição



- ⇒ **Tipo de Via:** Padrão
- ⇒ **Tipo de Análise:** Comportamento do Controlador Fuzzy quanto à Variação do Comprimento da Composição
- ⇒ **Configurações da Composição:**
- Curta: 1 locomotiva e 25 vagões, peso bruto de cada vagão de 50.000kg, e correspondendo as Figuras de A.25 à A.32;
 - Média: 2 locomotivas e 50 vagões, peso bruto de cada vagão de 50.000kg, e correspondendo as Figuras de A.33 à A.40;
 - Longa: 4 locomotivas e 100 vagões, peso bruto de cada vagão de 50.000kg, e correspondendo as Figuras de A.41 à A.48.

Resultados para uma Composição de Comprimento Curto

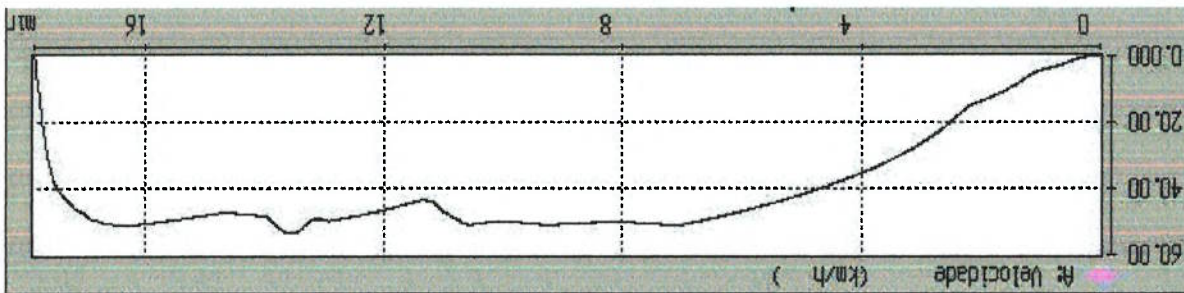


Figura A.25 – Velocidade da Composição

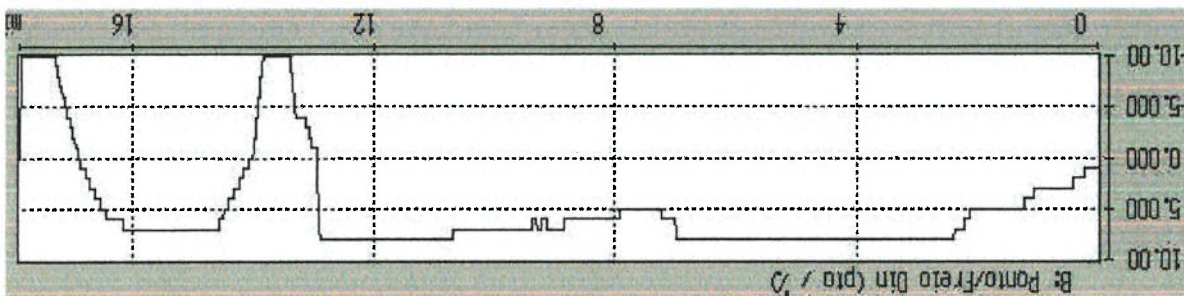


Figura A.26 – Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

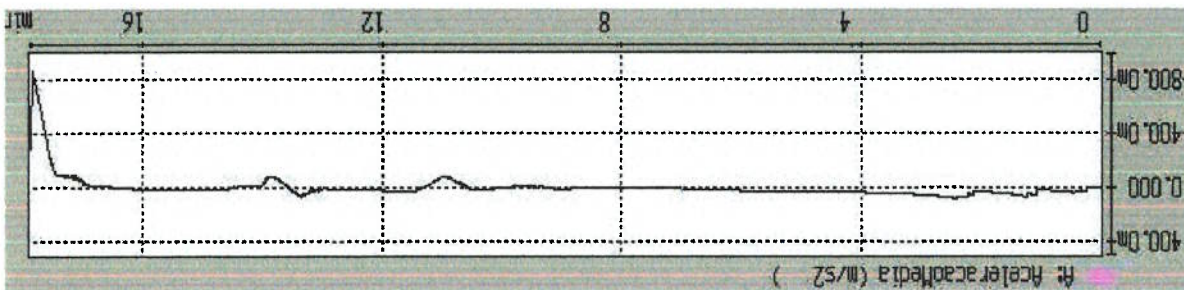


Figura A.27 – Aceleração Média da Composição

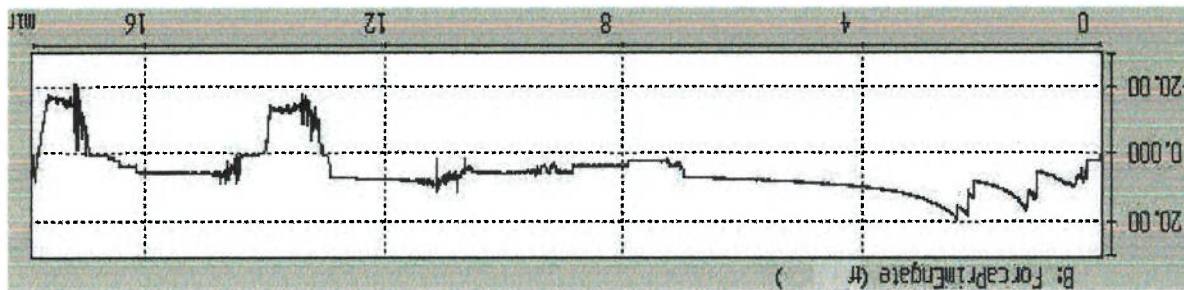
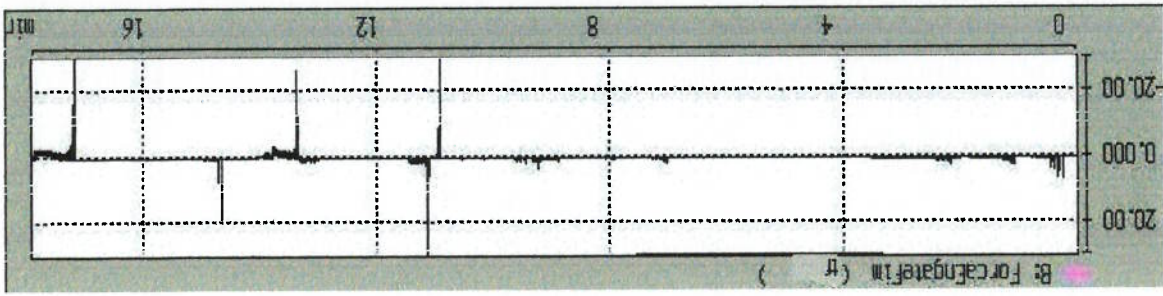


Figura A.28 – Esforço no 1º Engate da Composição após a Última

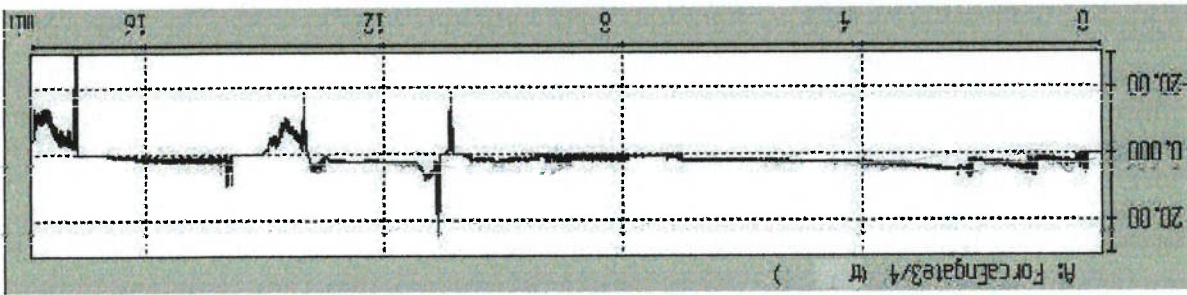
Locomotiva

Figura A.32 – Esforço no Último Engate da Composição



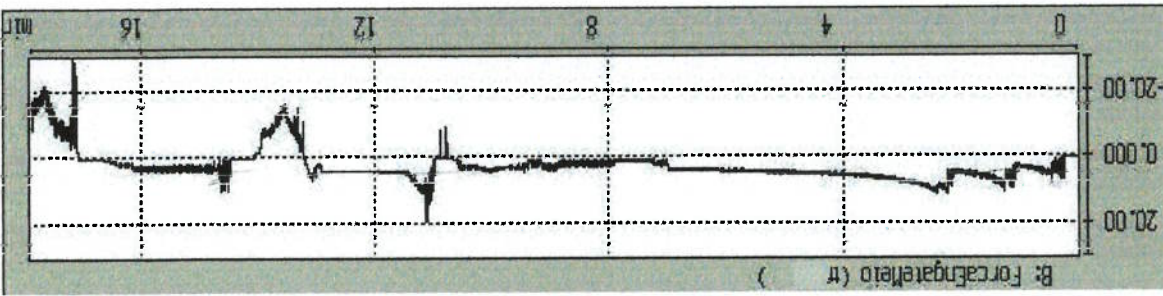
Locomotiva

Figura A.31 – Esforço no 18º Engate da Composição após a Última



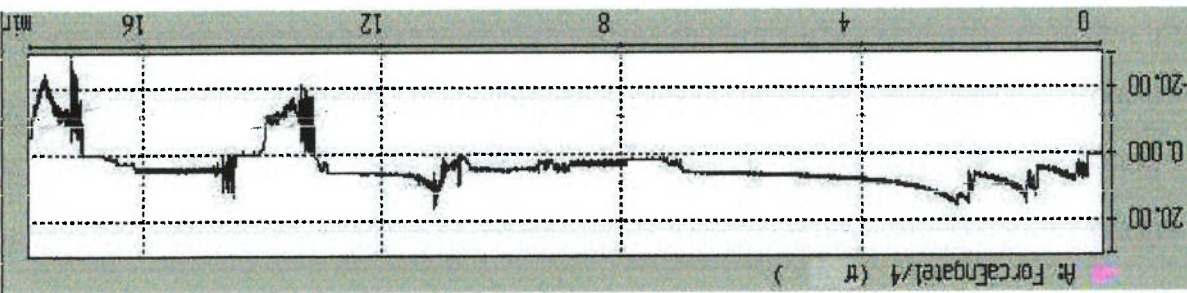
Locomotiva

Figura A.30 – Esforço no 12º Engate da Composição após a Última



Locomotiva

Figura A.29 – Esforço no 6º Engate da Composição após a Última



Resultados para a Composição de Comprimento Médio

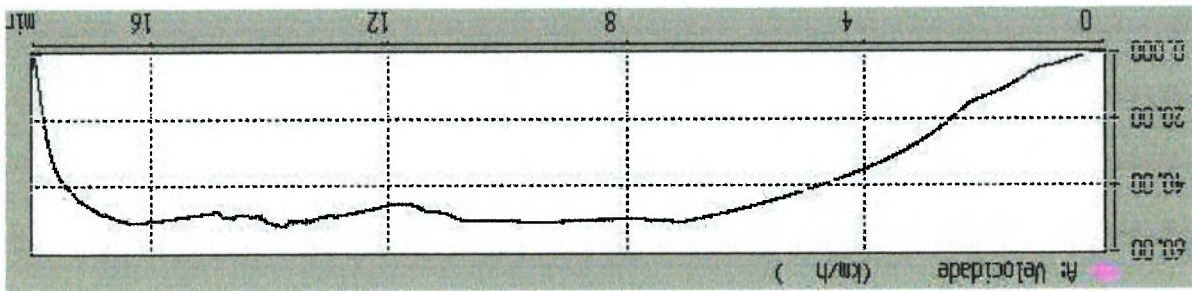


Figura A.33 – Velocidade da Composição

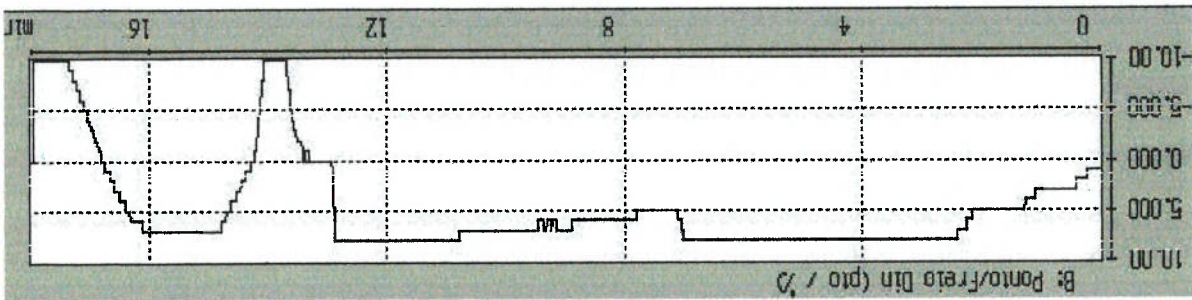


Figura A.34 – Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

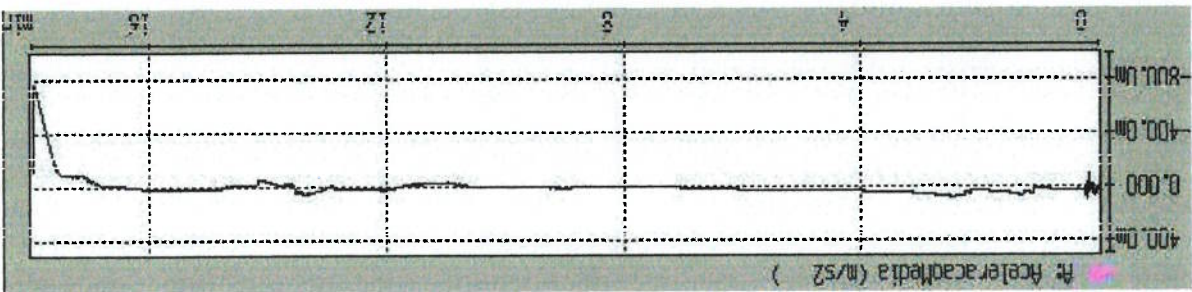


Figura A.35 – Aceleração Média da Composição

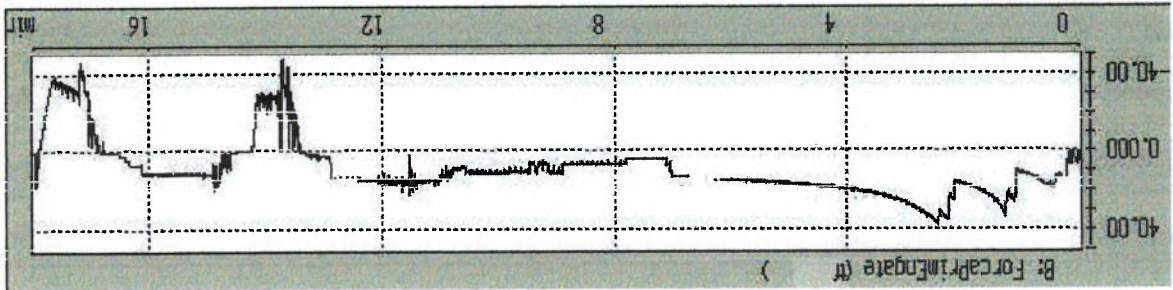
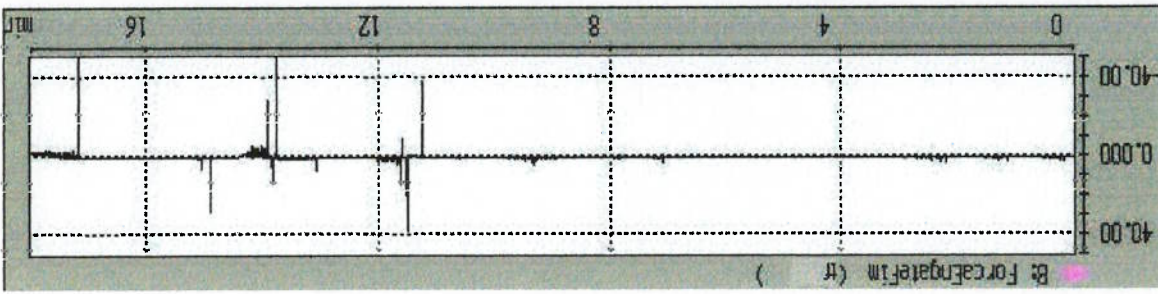


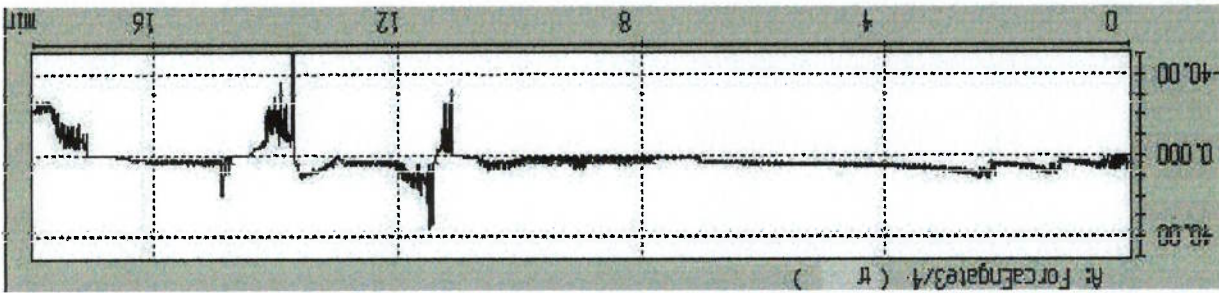
Figura A.36 – Esforço no 1º Engate da Composição após a Última Locomotiva

Figura A.40 – Esforço no Último Engate da Composição



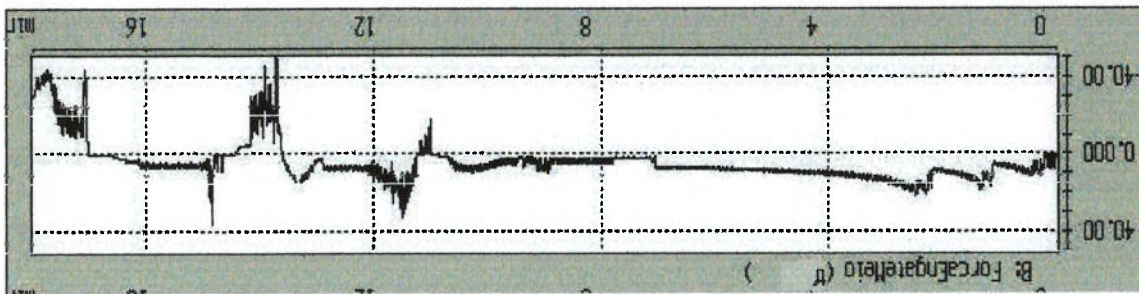
Locomotiva

Figura A.39 – Esforço no 37º Engate da Composição após a Última



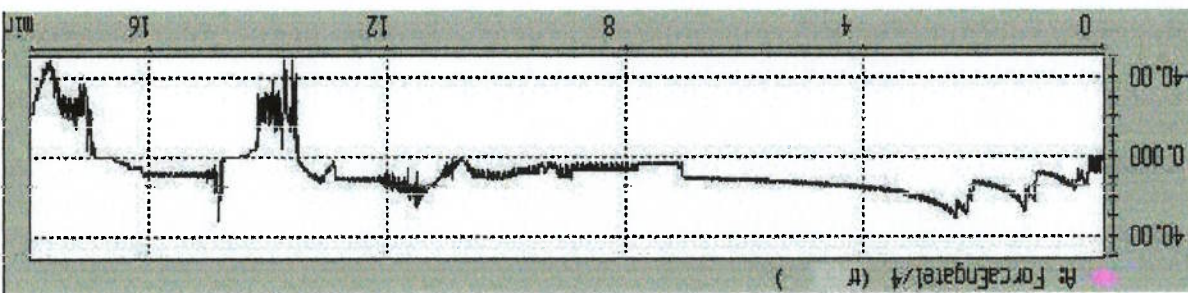
Locomotiva

Figura A.38 – Esforço no 25º Engate da Composição após a Última



Locomotiva

Figura A.37 – Esforço no 12º Engate da Composição após a Última



Resultados para uma Composição de Comprimento Longo

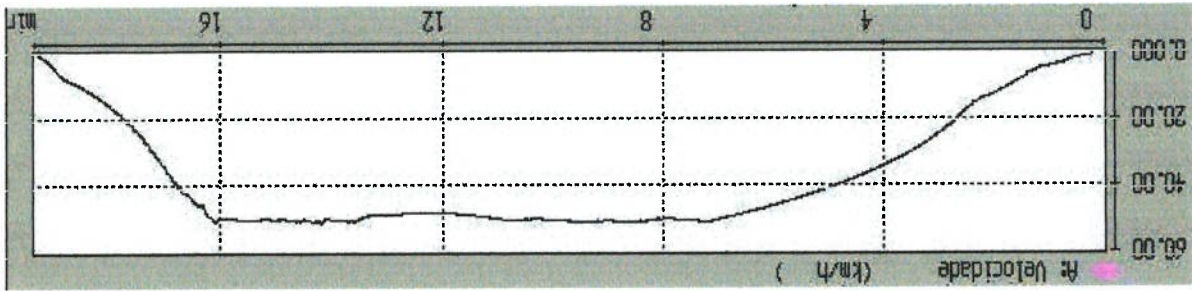


Figura A.41 – Velocidade da Composição

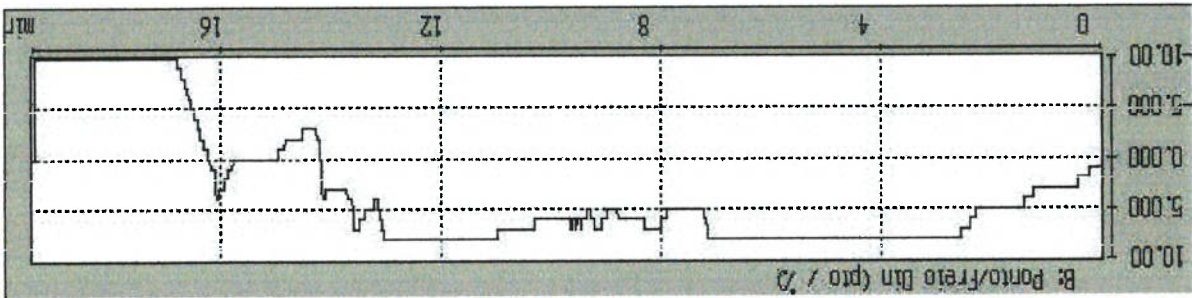


Figura A.42 – Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

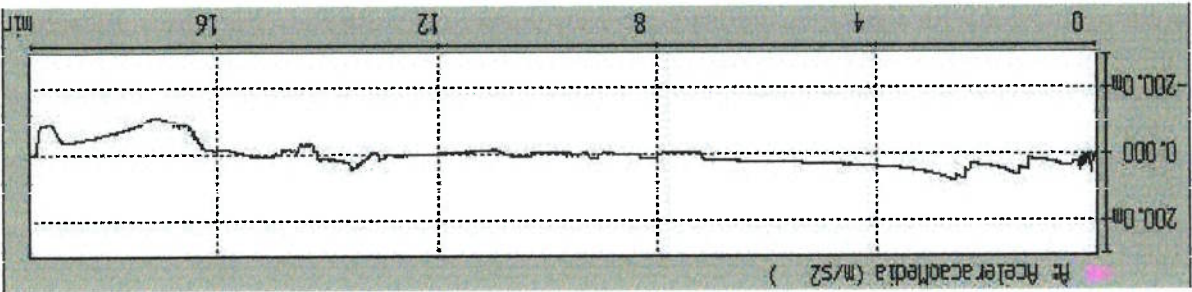


Figura A.43 – Aceleração Média da Composição

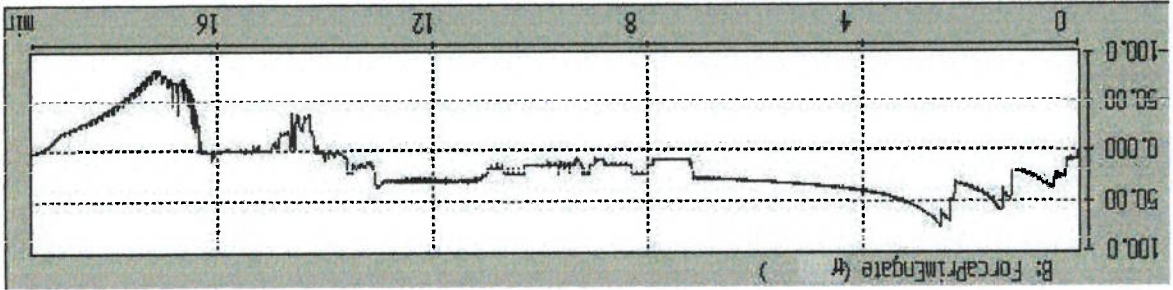
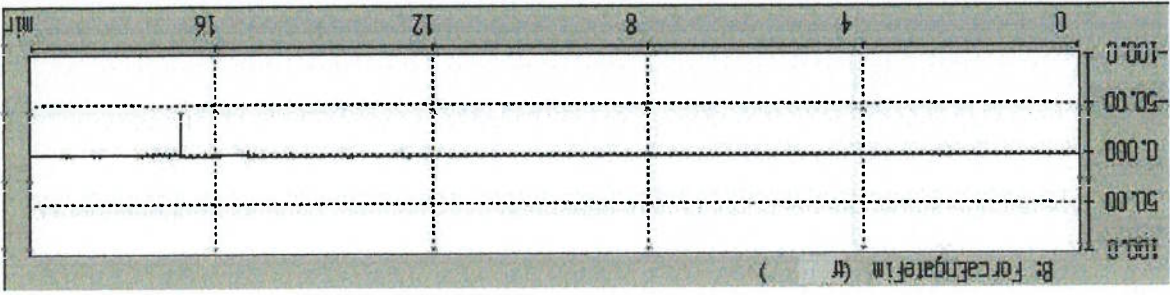


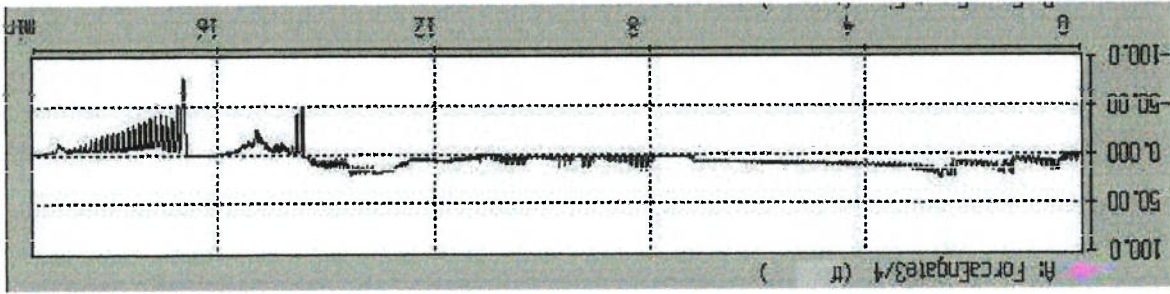
Figura A.44 – Esforço no 1º Engate da Composição após a Última Locomotiva

Figura A.48 – Esforço no Último Engate da Composição



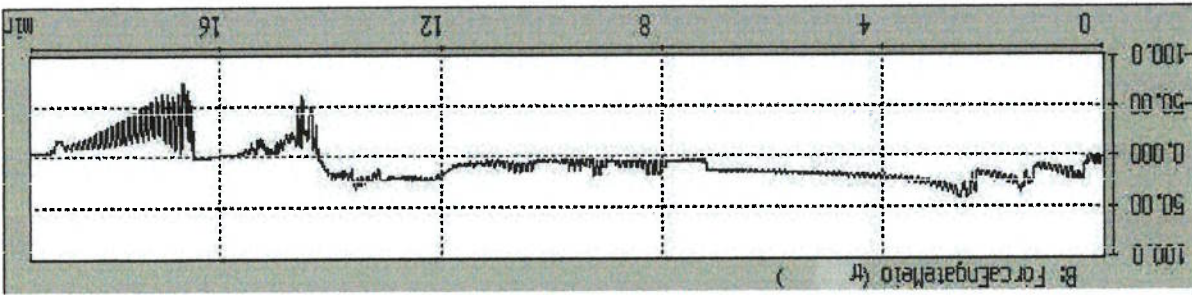
Locomotiva

Figura A.47 – Esforço no 75º Engate da Composição após a Última



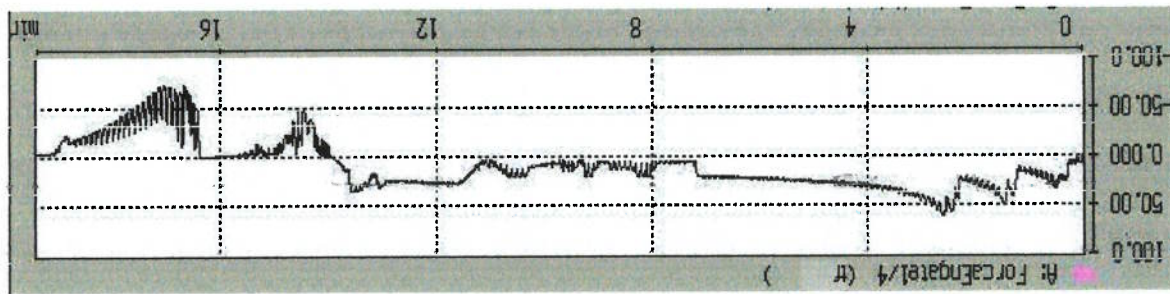
Locomotiva

Figura A.46 – Esforço no 50º Engate da Composição após a Última



Locomotiva

Figura A.45 – Esforço no 25º Engate da Composição após a Última



- ⇒ **Tipo de Via:** Real
- ⇒ **Tipo de Análise:** Comportamento Global do Controlador Fuzzy
- ⇒ **Configuração da Composição:**
 - Composição Típica: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto por vagão de 100.000kg, e correspondendo as Figuras de A.49 à A.54

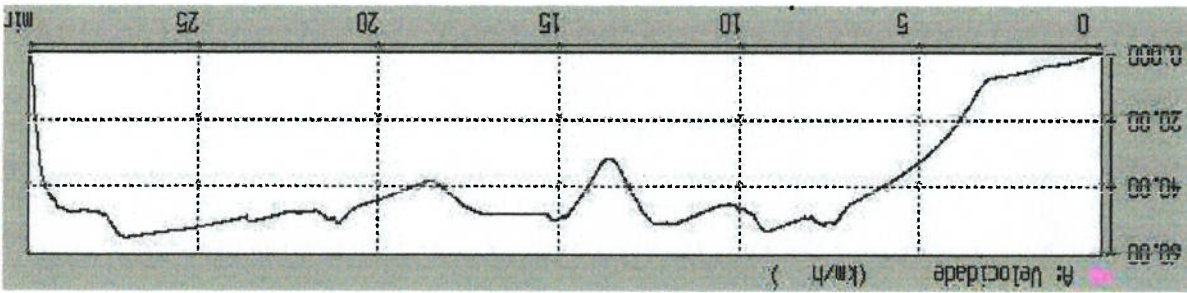


Figura A.49 – Velocidade da Composição

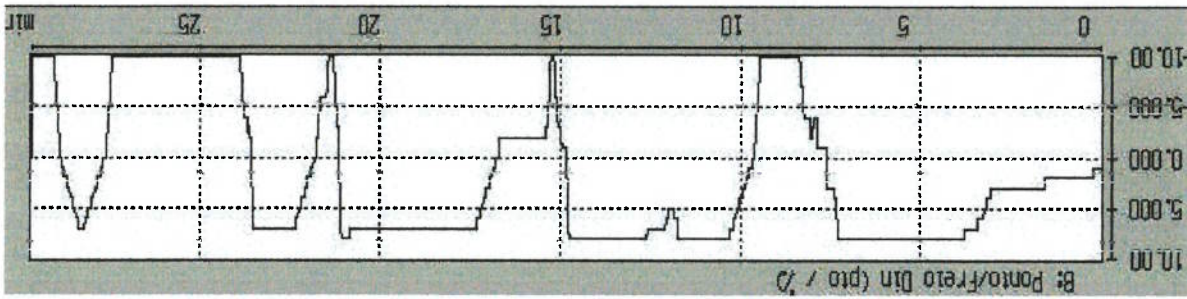


Figura A.50 – Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

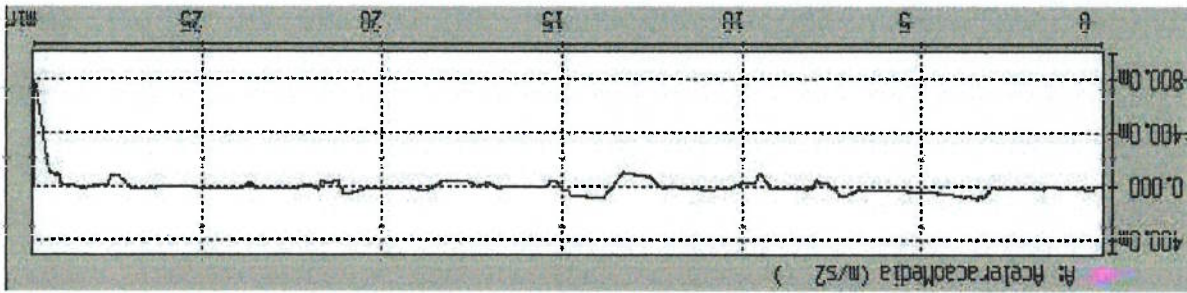


Figura A.51 – Aceleração Média da Composição

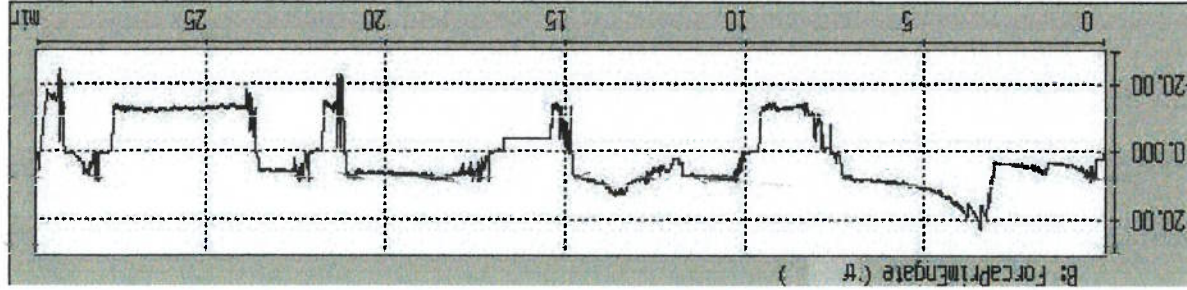


Figura A.52 – Esforço no 1º Engate após a Locomotiva

Figura A.54 – Esforço no Último Engate da Composição

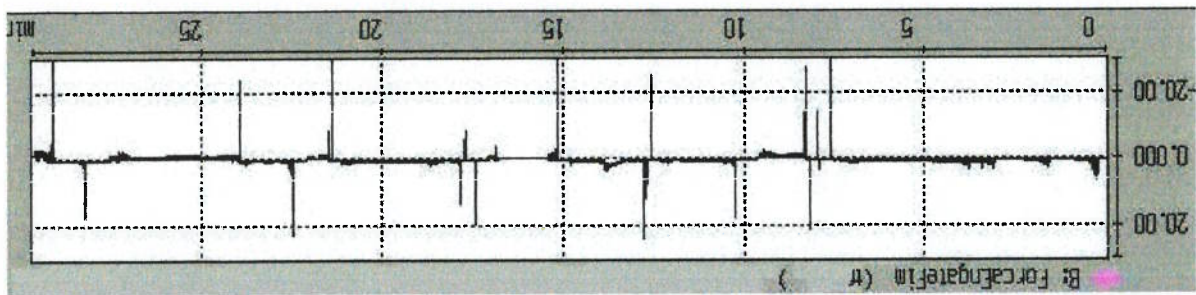
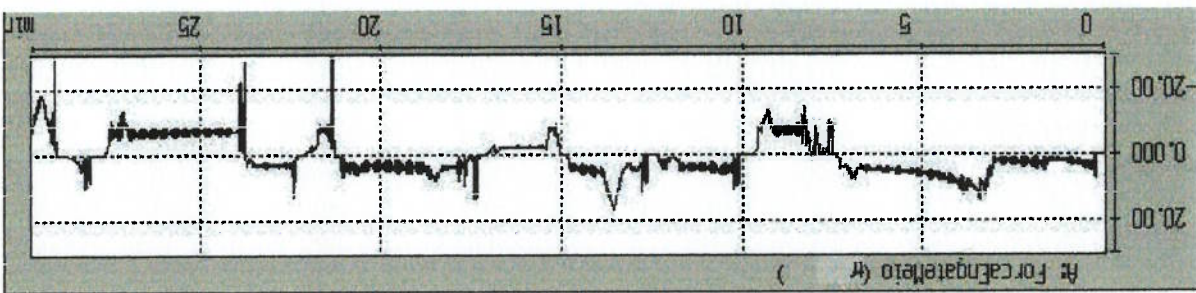


Figura A.53 – Esforço no 1º Engate da Composição após a Locomotiva



- ⇒ **Tipo de Via:** Real
- ⇒ **Tipo de Análise:** Comportamento do Controlador Fuzzy quanto à Variação do Carregamento da Composição
- ⇒ **Configurações da Composição:**
 - Leve: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto de cada vagão de 50.000kg, e correspondendo às Figuras de A.55 à A.60,
 - Médio: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto de cada vagão de 80.000kg, e correspondendo às Figuras de A.61 à A.66,
 - Pesado: 1 locomotiva e 20 vagões, peso bruto de cada vagão de 110.000kg, e correspondendo às Figuras de A.67 à A.72.

Resultados para Composição com Carregamento Leve

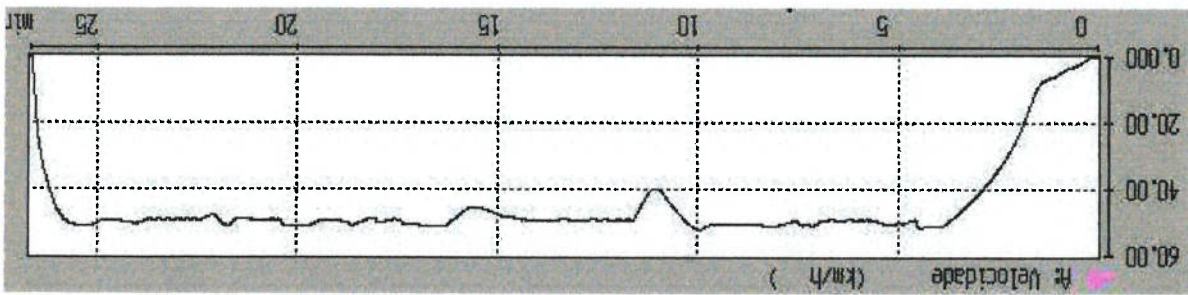


Figura A.55 - Velocidade da Composição

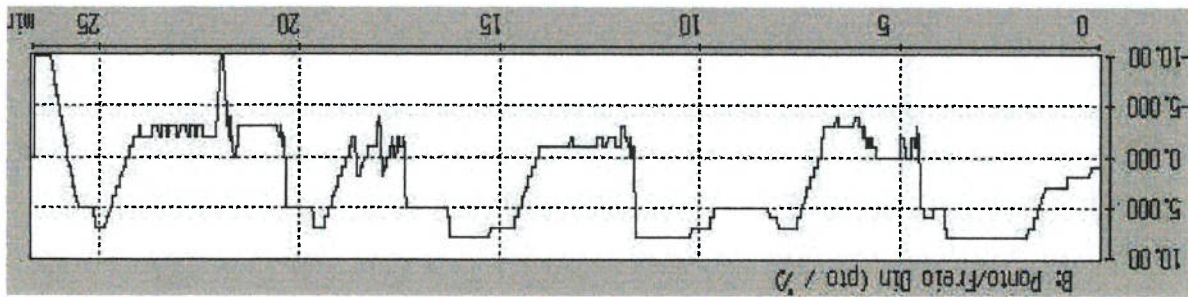


Figura A.56 - Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

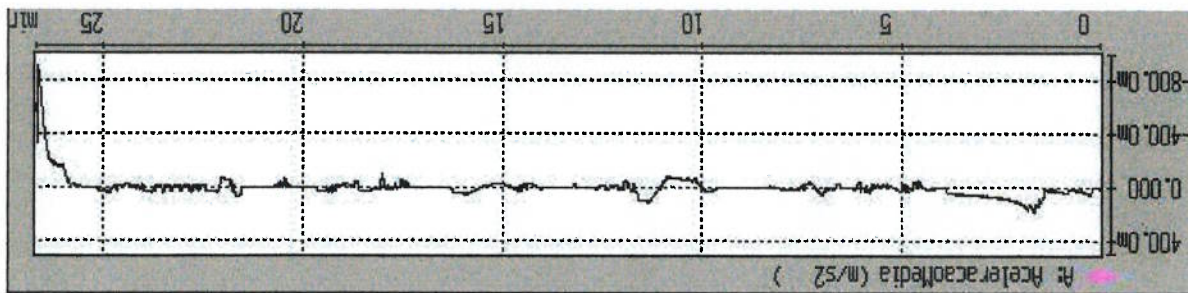


Figura A.57 - Aceleração Média da Composição

Figura A.60 - Esforço no Último Engate da Composição

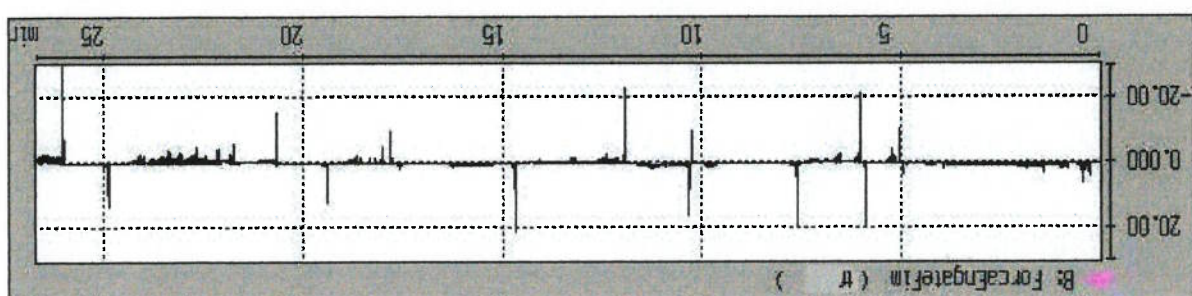


Figura A.59 - Esforço no 1º Engate após a Locomotiva

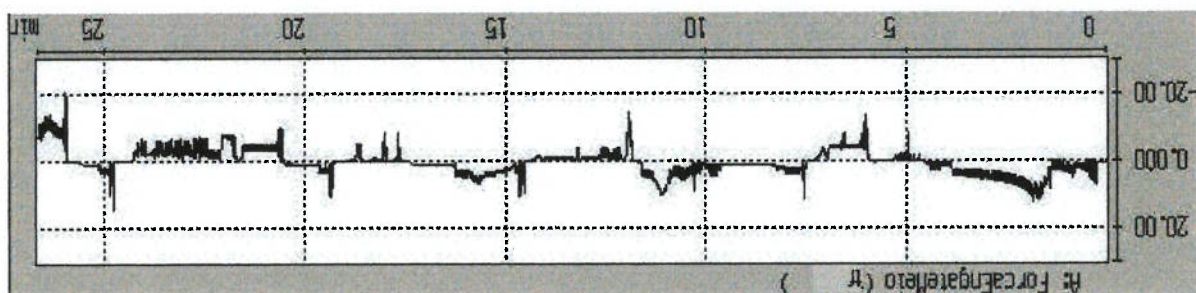
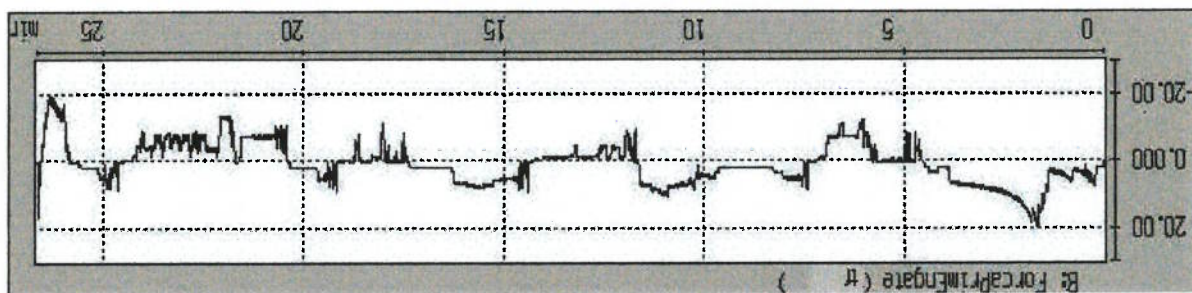


Figura A.58 - Esforço no 1º Engate após a Locomotiva



Resultados para Composição com Carregamento Médio

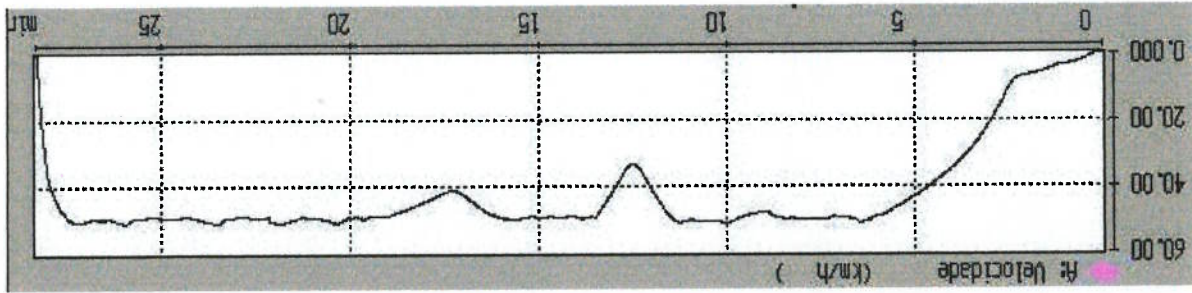


Figura A.61 - Velocidade da Composição

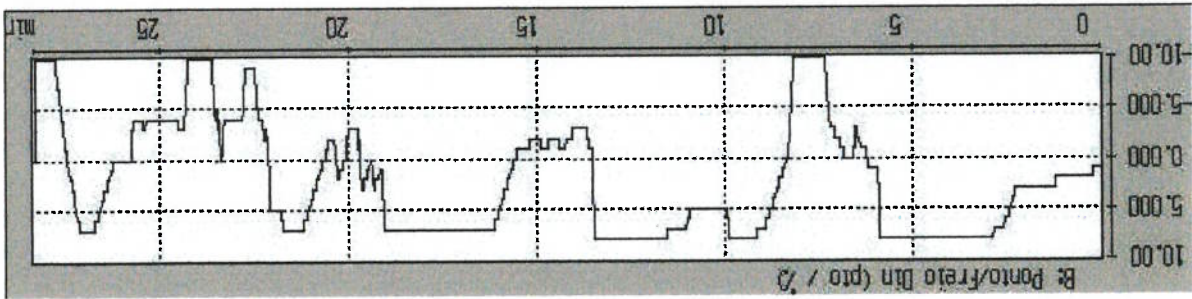


Figura A.62 - Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico



Figura A.63 - Aceleração Média da Composição

Figura A.66 - Esforço no Último Engate da Composição

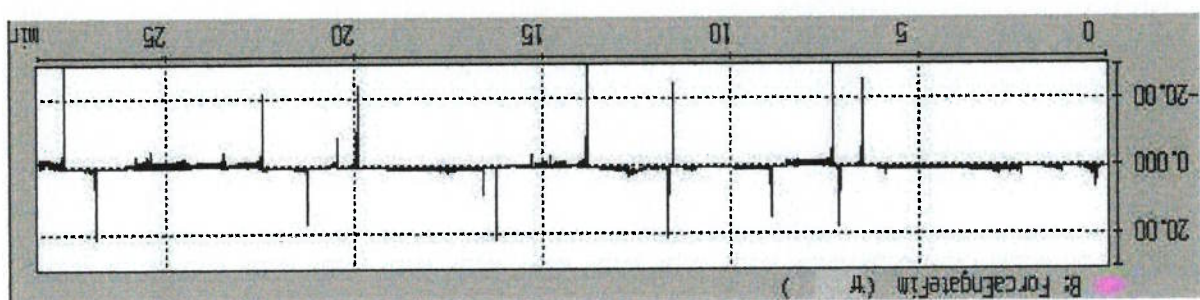


Figura A.65 - Esforço no 1º Engate após a Locomotiva

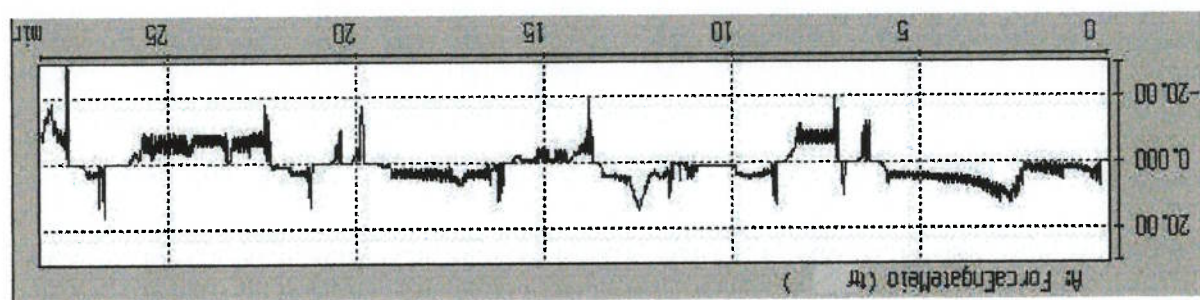
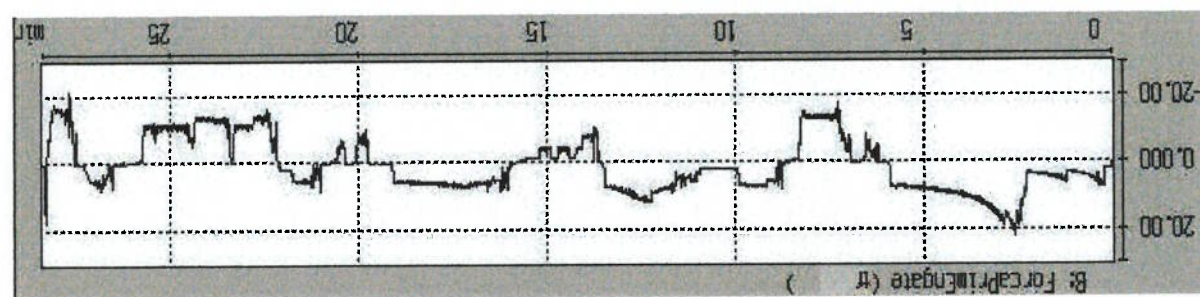


Figura A.64 - Esforço no 1º Engate após a Locomotiva



Resultados para a Composição com Carregamento Pesado

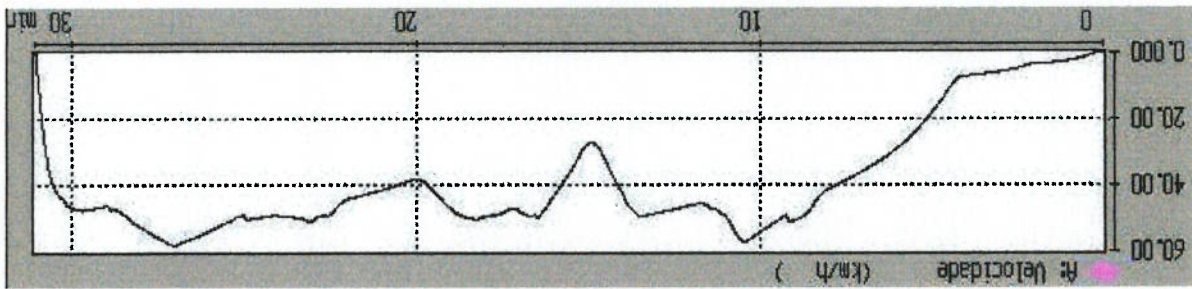


Figura A.67 - Velocidade Média da Composição

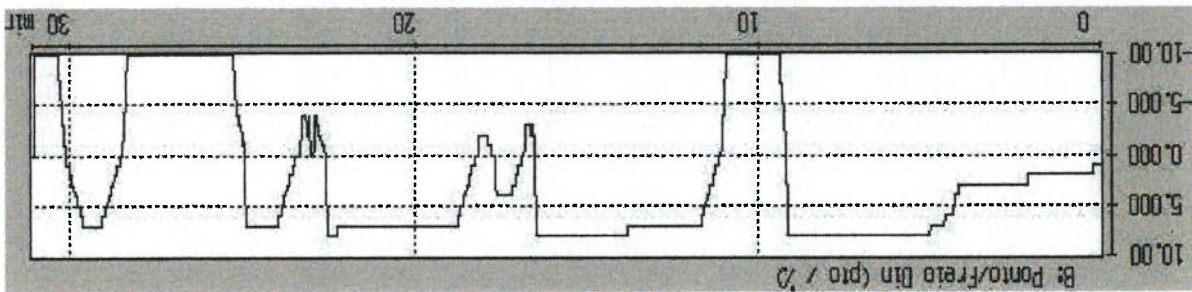


Figura A.68 - Ponto de Tração / Proporção de Freio Dinâmico

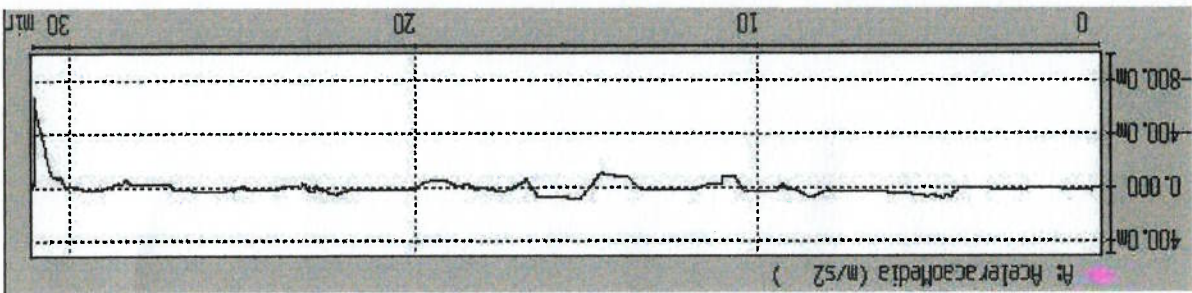


Figura A.69 - Aceleração Média da Composição

Figura A.72 - Esforço no Último Engate da Composição

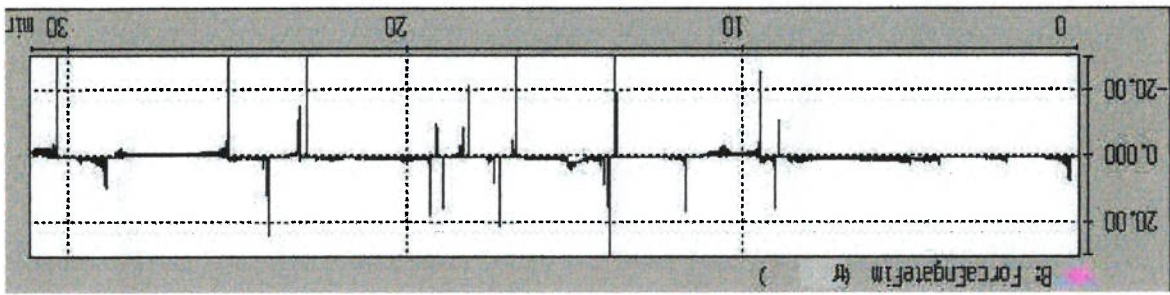


Figura A.71 - Esforço no 1º Engate após a Locomotiva

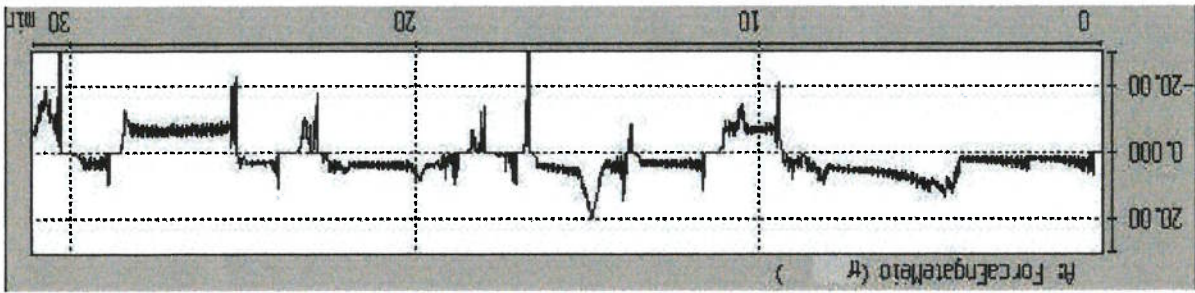
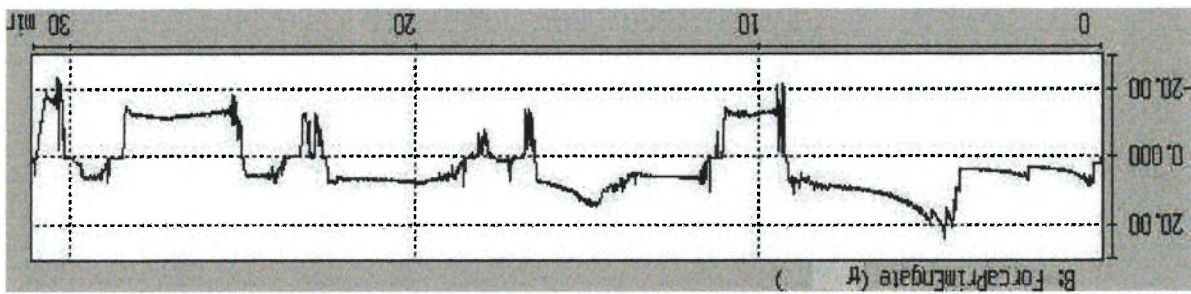


Figura A.70 - Esforço no 1º Engate após a Locomotiva



ANEXO B

Dados da Composição Ferroviária Modelada

B.1 - Dados da Locomotiva

- Modelo: U-20,
- Peso: 108.000kg,
- Comprimento: 20m,
- Área frontal: 6m²,
- Nº de Eixos: 6,
- Diâmetro da Roda: 0,9144m,
- Peso da Roda: 470kg.

B.2 – Dados do Vagão

- Tara: 30.000kg,

- Comprimento: 12m,

- Nº de eixos: 4,

- Nº cilindros de freio: 1,

- Diâmetro do cilindro de freio: 0,254m,

- Pressão Nominal do Encanamento Geral: 80psi.

B.3 – Outros Dados

- Bitola da Via : 1,6m,

- Coeficiente de atrito roda/trilho: 0,26.

ANEXO C

Método de Runge Kutta

Uma equação diferencial de primeira ordem é, por definição, da forma

$$F\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) = 0,$$

ou alternativamente

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (c.1)$$

É desejado-se determinar uma solução $y(x)$ em um intervalo $[a, b]$, que satisfaça

(c.1) em $[a, b]$ e para uma específica condição inicial.

Dividindo-se o intervalo $[a, b]$ em subintervalos, ou passos, o valor da solução verdadeira $y(x)$ é aproximado em $n+1$ valores, igualmente espaçados, de x ,

(x_0, x_1, \dots, x_n) de forma que o tamanho do passo h , é dado por:

$$h = \frac{b - a}{n} \quad (c.2)$$

e $x_i = x_0 + ih$, para $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Para este caso, o erro de discretização, ou erro de truncamento, é dado por:

$$\epsilon = y_i - y(x_i), \quad (c.3)$$

sendo y_i é o valor calculado na base de $n+1$ pontos e $y(x_i)$ o valor real da

função.

O método de Runge Kutta, diferentemente da Fórmula de Taylor, que necessita conhecer as derivadas de alta ordem da função, envolve somente o cálculo da derivada de primeira ordem, e produz resultados tão confiáveis quanto às

Fórmulas de Taylor de alta ordem. Todos os métodos de Runge-Kutta têm

algoritmos da forma:

$$y_{i+1} = y_i + h\phi(x_i, y_i, h) \quad (c.4)$$

Neste caso, ϕ é uma função incremento, que deve ser escolhida como uma aproximação adequada para a função $f(x,y)$, no intervalo $x_i \leq x \leq x_{i+1}$. Para o

algoritmo de 4º ordem, tem-se a seguinte equação:

$$\phi(x_i, y_i, h) = ak + 2k_2 + 2k_3 + k_4 \quad (c.5)$$

Assim, a formulação final, que é atribuída à Kutta, fica escrita como:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{8}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(x_i + y_i)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{4}hk_2 + \frac{3}{4}hk_1\right)$$

$$k_4 = f\left(x_i + h, y_i + hk_3\right)$$

(c.6)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Air Brake Association (1980), *Management of Train Operation and Train Handling*, Chicago.
- ANDRADE, M. T. (1997) *Notas de Aula do Curso Computação Fuzzy*.
- BARBOSA, R. S. (1993) *Estudo da Dinâmica Longitudinal do Trem*, tese (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, 1993.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H. A.; WILKES, J. O. (1969) *Applied Numerical Methods*, John Wiley & sons, Inc.
- DUKKIPATI, R.; AMYOT, J. (1988) *Computer - Aided Simulation in Railway Dynamics*, Marcel Dekker Inc., New York.
- GARG, V. K.; DUKKIPATI, R. (1984) *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press.
- ISHIBUCHI, H.; YOZAKI, K.; TANAKA, H. (1992) Distributed representation of fuzzy rules and its application to pattern classification. *Fuzzy Sets and Systems*, Nº52, p 21-32.
- JAGER, R. (1995) *Fuzzy Logic Control*. Delft. Tese (Doutorado) - Delft University.
- JANTZEN, J. (1998) *A Robustness Study of Fuzzy Control Rules*, Technical University of Denmark.
- KASAI, Y.; WATANABE, H. (1986) Expert system on chip: an engine for real time approximate reasoning, *IEEE Expert Systems Magazine*, Vol 1, p 55-62.
- KENDEL, A. (1992) *Fuzzy Expert Systems*. CRC Press.
- KICKERT, W. J.; LEMKE H. (1976) Application of a fuzzy controller in a warm water plant. *Automatica*, Nº 12, p 301-308.
- KIRK, D.; KING, R. (1972) *Train Handling Instructions*, Southern Pacific Transportation Company.
- KORNER, S. (1967) *Laws of Thought*, Encyclopaedia of Philosophy, Vol 4, Mac Millan, New York.

- LARKIN, L. I. (1984) A fuzzy logic controller for aircraft flight control. *First International Conference on Fuzzy Information Processing*. Hawaii.
- LEE, C. (1990) Fuzzy Logic Control Systems: Fuzzy Logic Controller, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, Vol. 20, No. 2.
- LEJEWSKI, C. (1967) Jan Lukaszewicz, *Encyclopaedia of Philosophy*, Vol. 5, Mac Millan, New York.
- LESMO, L. Et al. (1982) Learning of fuzzy production rules for medical diagnosis. *Approximate Reasoning in Decision Analysis*. North - Holland, p 249-260.
- MANDANI, E. H. (1974) Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. *Proceeding of the Institution of Electrical Engineers*, Vol 121, No. 12, December.
- NAKAMURA, K.; IWAI, S. (1982) Topological fuzzy sets as a quantitative description of analogical inference and its application to question – answering systems for information retrieval. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*. p 193-204.
- OSTERGARD, J. J. (1977) Fuzzy logic control of a heat exchanger process. *Fuzzy Automata and Decision Process*, North-Holland.
- PAPPIS, C. P.; MANDANI, E. H. (1977) A fuzzy logic controller for a traffic junction. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, SMC - 7 (10), p 707-717.
- PARKER, C.W. (1978) The Requirements of Good Train Handling for Heavy Long Trains, *Heavy Haul Conference*, Perth, Australia.
- SCHWARZ, T. J. (1990) Fuzzy systems in the real world. *AI Expert*.
- SUGENO, M.; NISHIDA, M. (1985) Fuzzy control of a model car. *Fuzzy Sets and Systems*, No. 16, p 103-116.
- SUGENO, M.; MURAKAMI, K. (1984) Fuzzy parking control of a model car. *23rd IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas.
- TAKAGI, T.; SUGENO, M. (1985) Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*. SMC-15(1), p 116-132.
- TERANO, T.; ASAI, K.; SUGENO, M. (1994) Automatic train operation. *Applied Fuzzy Systems*, Academic Press.
- UMBERS, J. G.; KING, P. J. (1980) Analysis of a human decision making in cement kiln control and the implications for automation. *International Journal*

- of Man, Machines Studies, Vol. 12, N°1, p 11-23.
- Union Pacific Railroad (1997). *Engineering's Train Handling Guide*.
64.
- URUGAMI, M. et al. (1976) Fuzzy robot control, *J. Cybernetic*, N°6 (1-2), p 39-64.
- WANG, L. X. (1994) *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, PTR Prentice Hall Inc.
- YAGISHITA, O. et al. (1985) Application of fuzzy reasoning to the water purification process. *Industrial Application of Fuzzy Control*. North - Holland.
- ZADEH, L. A. (1965) Fuzzy sets. *Information and Control*, N° 8, p.338-353.
- ZADEH, L. (1973) Outline of a new approach to the analysis of a complex systems and decision process, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetic*, Vol.SMC-3, N°1.