

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

DIREITO AUTÓRAL  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei nº 9.610/96.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sem a autorização dos seus  
empregados, eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM PÁTIO DE  
CLASSIFICAÇÃO DE VAGÕES: ESTUDO DE CASO PARA  
APLICAÇÃO DE UM MODELO NEUROFUZZY

Jedson Alessandro Damasceno

N.Cham 621.3 D155m 2004

Autor: Damasceno, Jedson Alessandro

Título: Modelagem e simulação de um páti



123300403

Ac. 364964



LEI DO DIREITO AUTORAL  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 355

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM PÁTIO DE  
CLASSIFICAÇÃO DE VAGÕES: ESTUDO DE CASO PARA  
APLICAÇÃO DE UM MODELO NEUROFUZZY**

*Jedson Alessandro Damasceno*

DATA DA DEFESA: 06/02/04

364364

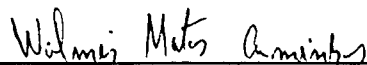
"MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM  
PÁTIO DE CLASSIFICAÇÃO DE VAGÕES:  
ESTUDO DE CASO PARA A APLICAÇÃO  
DE UM MODELO NEUROFUZZY"

JEDSON ALESSANDRO DAMASCENO

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

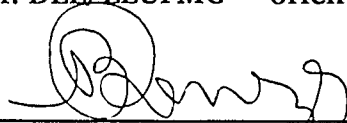
Aprovada em 06 de fevereiro de 2004.

Por:



---

Walmir Matos Caminhas – Dr.  
Prof. DEE/EEUFMG – orientador



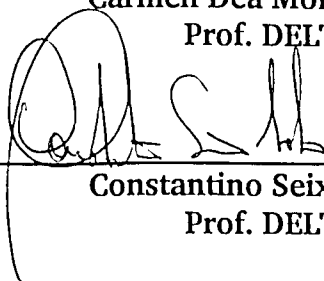
---

Benjamin Rodrigues de Menezes – Dr.  
Prof. DELT/EEUFMG



---

Carmen Déa Moraes Pataro – Dra.  
Prof. DELT/EEUFMG



---

Constantino Seixas Filho – Mestre  
Prof. DELT/EEUFMG

Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica

3.11  
3.15  
2002

DIREITO AUTORAL  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei nº 9.610/98.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

Modelagem e Simulação de um Pátio de Classificação de Vagões: estudo de  
caso para a Aplicação de um Modelo Neurofuzzy

Por

Jedson Alessandro Damasceno

Texto de dissertação submetido à Banca Examinadora designada pelo  
Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a  
obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Walmir Matos Caminhas

Belo Horizonte – Brasil

Fevereiro de 2004



LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

*À minha família e namorada, razão principal de todas minhas conquistas.*

LEI DO DIREITO AUTORAL  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

*Agradeço a ATAN Sistemas de Automação pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho, contribuindo para o crescimento técnico e profissional de seu funcionário. Aos colegas Ronan Antônio da Silveira Starling, Wagner Francisco Marques, Rodrigo Madeira Marques e Lucas Gomes Dutra Nicácio, equipe com a qual tenho orgulho de ter trabalhado, meu especial agradecimento. Ao Professor Walmir Matos Caminhas, meu agradecimento pela sua enorme contribuição e apoio.*



LEI DO DIREITO AUTORAL  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

***“A imaginação é mais importante que o conhecimento”.***

*Albert Einstein*

## Resumo

O presente trabalho consiste na análise e proposta de melhorias do sistema de controle de um pátio de classificação de vagões, também conhecido como *Hump Yard*, pertencente a uma companhia mineradora brasileira.

Um *Hump Yard* é, fisicamente, uma rampa seguida de um sistema de frenagem e ramificações de linha férrea em um único pátio. O processo é baseado na ação da gravidade e a atuação é feita através de um ponto de frenagem, o qual determina a velocidade de saída dos vagões, buscando o encaixe suave dos mesmos no final da linha de destino. A finalidade deste *Hump Yard* é permitir que os vagões descarregados que estejam em estado operacional, possam ser separados dos que necessitam de manutenção. Este sistema é de fundamental importância para seu usuário, uma vez que representa um gargalo para a liberação de vagões vazios, operando continuamente.

Numa análise mais detalhada ao longo deste trabalho será visto que para o estudo do processo como um todo e atendendo uma necessidade do projeto nos testes de plataforma, foi fundamental a elaboração de um simulador do sistema. Este estudo possibilitou a geração de uma Banco de Dados e a aplicação de um modelo baseado em rede *neurofuzzy*, apresentado aqui como proposta de melhoria do algoritmo original.

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
emitido sem a qualificação dos meios  
eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.



## Abstract

The present work consists of the control system analysis and improvements proposal of a railroad classification yard, also known as Hump Yard, belonging to a Brazilian miner company.

A Hump Yard is, physically, a ramp followed by a breaking system and tracks of railroads in a yard. The process is based on the gravity action and the acting is made through a breaking point, which determines the exit speed of the wagons, looking for the soft fitting of the same ones in the end of the destiny track. The purpose of this Hump Yard is to allow that the discharged wagons in operational state, could be separated from the ones that need maintenance. This system is of fundamental importance for its user, once it represents a bottleneck for the empty wagons liberation, operating continually.

In a more detailed analysis along this work will be seen that for the whole process study and assisting a need of the project in the platform tests, it was fundamental the elaboration of a system's simulator. This study made possible the generation of a database and the model application based on neurofuzzy network, presented here as improvement proposal of the original algorithm.

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – <i>Hump Yard</i> da Burlington Northern Santa Fe’s (EUA) .....	1
Figura 1.2 – <i>Hump Yard</i> da Norfolk Southern (EUA) .....	2
Figura 1.3 – <i>Hump Yard</i> da Triage (Luxembourg) .....	2
Figura 1.4 – <i>Hump Yard</i> da Burlington Northern Santa Fe’s (EUA) .....	3
Figura 1.5 – <i>Hump Yard</i> da Norfolk Southern (EUA) .....	3
Figura 1.6 – <i>Hump Yard</i> da Belt Railway of Chicago (EUA) .....	4
Figura 1.7 – O pátio de classificação .....	5
Figura 2.1 – Estruturação do projeto .....	11
Figura 2.2 – Curva de velocidade de um corte (com 2 vagões) .....	12
Figura 2.3 – Simulação de um circuito de via .....	13
Figura 2.4 – Simulador do pátio de classificação de vagões ( <i>Hump Yard</i> ) .....	15
Figura 3.1 – Desenho esquemático do <i>Hump Yard</i> .....	17
Figura 3.2 – Cálculo da rolabilidade através de medidas em campo .....	19
Figura 3.3 – Relação entre a velocidade de saída e a velocidade de engate .....	21
Figura 3.4 – Fluxograma para cálculo da velocidade de saída .....	26
Figura 4.1 – Mapeamento do sistema .....	27
Figura 4.2 – Estrutura do NFN .....	29
Figura 4.3 – Funções de petinência .....	30
Figura 4.4 – Mecanismo de inferência do NFN .....	30
Figura 4.5 – Gerador de dados do <i>Hump Yard</i> (Calcula_Vo) .....	34
Figura 4.6 – Velocidade de saída X vagões classificados .....	36
Figura 4.7 – <i>Notch</i> inicial aplicado X peso total do corte .....	36
Figura 4.8 – Velocidade de saída da rede X velocidade de saída original (1º teste) .....	37
Figura 4.9 – <i>Notch</i> inicial da rede X <i>notch</i> inicial original (1º teste) .....	38
Figura 4.10 – Erro quadrático (1º teste) .....	38
Figura 4.11 – Comparação dos erros percentuais (1º teste) .....	39
Figura 4.12 – Velocidade de saída da rede X velocidade de saída original (2º teste) .....	40
Figura 4.13 – <i>Notch</i> inicial da rede X <i>notch</i> inicial original (2º teste) .....	41
Figura 4.14 – Erro quadrático (2º teste) .....	41
Figura 4.15 – Comparação dos erros percentuais (2º teste) .....	42
Figura 4.16 – Estrutura do programa Yamakawa_Delphi .....	44
Figura 4.17 – Função 01: treinamento + validação .....	45
Figura 4.18 – Função 02: validação .....	46
Figura 4.19 – Função 03: validação em tempo real .....	46
Figura 4.20 – Velocidade de saída .....	47
Figura 4.21 – <i>Notch</i> inicial .....	48
Figura 4.22 – Erro quadrático .....	49
Figura 4.23 – Cálculo em tempo real .....	50
Figura 4.24 – Erro por amostra .....	51
Figura 5.1 – Estrutura do projeto proposto .....	53
Figura 5.2 – Treinamento após classificação com sucesso .....	55
Figura 5.3 – Cálculo das saídas .....	55



# Lista de Tabelas

TABELA 3.1.....	23
TABELA 4.1.....	35

**LEI DO DIREITO AUTORAL**  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

# Lista de Abreviaturas e Siglas

CLP – Controlador Lógico Programável.

OPC – OLE for Process Control.

OLE – Object Linking and Embedding.

RNA – Rede Neural Artificial.

NFN – Neo Fuzzy Neuron.

RNF – Rede Neurofuzzy.

MLP – Multilayer Perceptron.

MATLAB<sup>®</sup> – Mathematic Laboratory.

LEI DO DIREITO AUTORAL.  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados, eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

# Glossário

Car-dampers	Descarregadores de vagões.
Circuito de via	Instrumentação que detecta a presença dos vagões na linha férrea.
Corte	Conjunto par de dois a dez vagões que possuem o mesmo destino.
Doppler	Efeito da variação do comprimento de onda devido ao movimento da fonte emissora.
Encoder	Gerador de sinal de pulsos elétricos.
Hump Yard	Pátio de classificação de vagões, do inglês pátio com topologia de “corcova”.
Lista de corte	Lista com as informações dos cortes em sequência.
Máquina de chave	Dispositivo mecânico pneumático que comuta a direção da linha férrea no intuito de alinhar rotas.
Multi-threaded	Várias unidades de execução independentes do sistema operacional.
Notch	Nível de frenagem aplicado pelo retardador.
Pedal	Sensor indutivo localizado na linha férrea para contagem de eixos.
Rechego	Operação de nivelamento do resto de minério nos vagões.
Retardadores	Dispositivo mecânico de frenagem dos vagões na linha férrea.
Rolabilidade	Variável obtida a partir de equação matemática, que quantifica o movimento dos vagões, considerando a resultante das forças em suas partes girantes.
Sapatas	Dispositivo mecânico de frenagem dos vagões.
Set-point	Valor desejado para uma variável controlada.

# Sumário

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviatura e Siglas

Glossário

CAPÍTULO I – Introdução e Motivação .....	1
1.1 Considerações Gerais.....	1
1.2 Descrição do Pátio de Classificação Estudado [6],[7].....	5
1.3 Organização da Dissertação .....	8
CAPÍTULO II – Simulação do <i>Hump Yard</i> .....	10
2.1 Estruturação do Projeto.....	10
2.2 Implementação do Simulador.....	11
2.2.1 Teoria de Programação [16].....	14
2.2.2 Utilização do Simulador.....	15
2.3 Resultados Obtidos .....	16

LEI DO DIREITO AUTORAL  
Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.  
Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.



<b>CAPÍTULO III – Modelagem do Sistema [7]</b> .....	<b>17</b>
3.1 Considerações Iniciais .....	17
3.2 Cálculo de Rolabilidade Através de Medidas em Campo .....	18
3.3 Relação entre a Velocidade de Saída e a Velocidade de Engate.....	20
3.4 Algoritmo de Controle do Sistema Original .....	22
3.4.1 Rolabilidade do Corte .....	22
3.4.2 Velocidade de Saída.....	23
<b>CAPÍTULO IV – Proposta de um Modelo com Rede Neurofuzzy</b> .....	<b>27</b>
4.1 Introdução .....	27
4.2 Estrutura da Rede Neurofuzzy Proposta [2].....	28
4.3 Aprendizado da Rede Neurofuzzy [2] .....	31
4.4 Geração de um Banco de Dados do Sistema.....	31
4.5 Análise do Banco de Dados Gerado .....	35
4.6 Primeiras Análises com o MATLAB® .....	37
4.7 Estruturação e Desenvolvimento do Aplicativo em Delphi.....	42
4.8 Demonstração com os Dados Simulados.....	47
<b>CAPÍTULO V – Conclusões e Proposta de Continuidade</b> .....	<b>52</b>
5.1 Fundamentos da Proposta .....	52
5.2 Estrutura do Projeto .....	52
5.3 Treinamento da Rede com os Dados Reais do Processo .....	54
5.4 Conclusões .....	55

# CAPÍTULO I – Introdução e Motivação

## 1.1 Considerações Gerais

Visando o constante acompanhamento do crescimento da economia do País, os níveis de produção e distribuição de mercadorias necessitam de capacidades cada vez maiores, sendo que a logística do transporte de mercadorias é fundamental neste cenário. No caso do setor de mineração, o transporte efetuado por linhas férreas necessita de uma administração cada vez mais eficiente do seu tráfego, uma vez que as linhas férreas existentes são poucas para atender a tamanha demanda. Dentro deste perfil, ferrovias que possuem sistemas automatizados de administração deste transporte estão um passo à frente para atender às demandas de hoje e do futuro.

Sistemas de classificação de vagões do tipo *Hump Yard* são muito utilizados na América do Norte, que atualmente possui 58 sistemas deste tipo em operação [20],[21]. Sistemas como o “Belt Railway of Chicago” chegam a classificar 2000 vagões por dia. Existem sistemas que chegam a classificar até 4000 vagões por dia [13]. Para ilustrar, as Figuras 1.1 a 1.6 mostram alguns sistemas de classificação deste tipo fora do Brasil, existentes na atualidade.



Figura 1.1 – *Hump Yard* da Burlington Northern Santa Fe's (EUA)

Fonte: KUBE, 2002, p.50-52.





Figura 1.2 – *Hump Yard* da Norfolk Southern (EUA)

Fonte: <<http://www.rr-fallenflags.org/ns/ns-yard-ckr.jpg>>



Figura 1.3 – *Hump Yard* da Triage (Luxembourg)

Fonte: <<http://www.rail.lu/triagebettembourg.html>>





Figura 1.4 – *Hump Yard* da Burlington Northern Santa Fe's (EUA)

Fonte: <<http://www.trains.com/Content/Dynamic/Articles/000/000/002/462xfmnl.asp>>



Figura 1.5 – *Hump Yard* da Norfolk Southern (EUA)

Fonte: <<http://www.trains.com/Content/Dynamic/Articles/000/000/002/466szbkm.asp>>

DIREITO AUTORAL  
 todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 permitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.





Figura 1.6 – *Hump Yard* da Belt Railway of Chicago (EUA)

Fonte: <http://www.dhke.com/CRJ/hayford.html>

O maior desafio destes sistemas está na precisão do cálculo e controle de velocidade dos vagões, uma vez que os mesmos descem uma rampa por força da gravidade e precisam “engatar” nos vagões que já foram classificados, ao final da descida. Muitos trabalhos já foram desenvolvidos fora do Brasil, no intuito de se estudar e otimizar um *Hump Yard* [8],[9],[10],[11],[17] e com o avanço da tecnologia, sistemas cada vez melhores estão surgindo para a realização deste controle de velocidade [13].

Neste contexto, o único *Hump Yard* do Brasil, pertencente a uma Cia. Mineradora, foi modernizado pela ATAN Sistemas de Automação [19] e, durante as etapas de levantamento de dados e projeto, o estudo do modelo, conceitos e dimensionamentos adotados no sistema foram inevitáveis, possibilitando a avaliação e o tratamento de limitações funcionais do sistema atual [4]. Dessa forma, a ATAN buscou uma parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais, no intuito de pesquisar e sugerir melhorias ao Sistema [4], gerando como principal fruto o conteúdo deste trabalho.

## 1.2 Descrição do Pátio de Classificação Estudado [6],[7]

O Pátio de Classificação de Vagões (Figura 1.7), objeto de estudo deste trabalho, tem a finalidade de classificar vagões de diferentes tipos, em grupos. Após a inspeção dos vagões (feita manualmente nos postos de inspeção), é gerada uma lista que é informada ao sistema de classificação, com as informações relativas aos vagões. Estas informações são utilizadas pelo aplicativo de classificação para a geração de uma Lista de Corte<sup>1</sup>, separando os vagões em conjuntos do mesmo tipo (denominado corte) com os respectivos destinos. Estes cortes são, então, empurrados a uma velocidade constante, seqüencialmente desengatados no topo da rampa e controlados pelo *software* de controle através de sensores e atuadores, a fim de:

- controlar a velocidade dos vagões, utilizando um conjunto de retardadores (freios eletropneumáticos), no intuito de se obter a velocidade de saída dos mesmos;
- controlar a rota dos vagões até atingir a linha de classificação de destino.

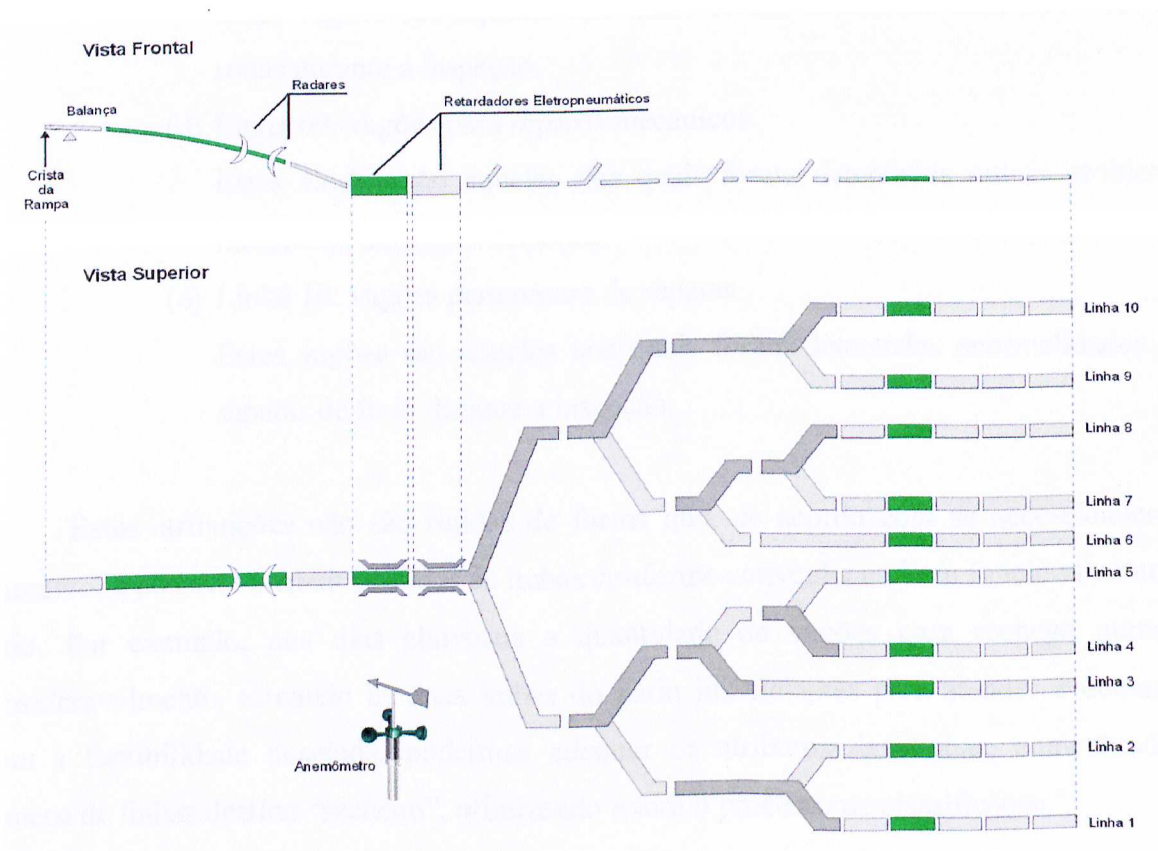


Figura 1.7 – O pátio de classificação

<sup>1</sup> Corte é o conjunto par de dois a dez vagões que possuem o mesmo destino.



Embora haja diversas entidades envolvidas no processo de classificação, uma descrição física mais detalhada, para os propósitos deste trabalho, só é necessária no que se refere ao pátio de classificação e à rampa que o antecede.

O pátio analisado neste trabalho possui 10 linhas de classificação. Cada linha está associada a um destino, sendo:

- (a) Linhas 01 e 02: vagões para recheio (vagões com resto de material).

Após a passagem pelos *car-dampers* (descarregadores), existem vagões que, devido à umidade ou a outros motivos quaisquer, retêm uma quantidade considerável de minério. A operação de nivelamento desse minério, no interior do vagão, a fim de manter a distribuição de peso, é chamada de recheio.

- (b) Linhas 03 a 07: vagões sem problemas.

Estes vagões são, posteriormente, levados para o pátio de formação e constituem os próximos lotes que retornam para as minas.

- (c) Linha 08: vagões para exame de rodas.

Estes vagões são aqueles nos quais foram detectadas anormalidades nas rodas durante a inspeção.

- (d) Linha 09: vagões para reparos mecânicos.

Estes vagões são aqueles nos quais foram detectados outros problemas mecânicos durante a inspeção.

- (e) Linha 10: vagões para reparo de sapatas.

Estes vagões são aqueles nos quais foram detectadas anormalidades nas sapatas de freio durante a inspeção.

Estas atribuições não são rígidas de forma que, de acordo com as necessidades do momento, é possível atribuir destinos às linhas conforme convenha ao bom funcionamento do pátio. Por exemplo, nos dias chuvosos a quantidade de vagões para recheio aumenta consideravelmente, tornando as duas linhas do pátio insuficientes para atender à demanda. Com a flexibilidade desejada, podem-se adequar os atributos das linhas, aumentando o número de linhas destino “recheio”, otimizando assim o processo de classificação.

Para a aplicação do algoritmo de controle proposto no projeto do *Hump Yard* foram necessários computadores (estações de supervisão e operação) de alta capacidade de processamento e principalmente instrumentos de campo com garantia de qualidade na leitura dos sinais, permitindo uma correta classificação do corte. Dessa forma, foram estudados os sensores e atuadores existentes, bem como propostos novos equipamentos no projeto de modernização [3], sendo todos eles ligados ao CLP (controlador lógico programável), também especificado no projeto. A seguir, serão descritos estes dispositivos de campo:

- CLP: composto de cartões de entradas e saídas digitais e de entradas analógicas, é responsável por todo o algoritmo de controle físico do processo de classificação, incluindo controle de velocidade, controle de rotas e retirada;
- Balança: trilho instrumentado com célula de carga. Mede o peso por eixo de cada vagão, informando a totalização deste peso para cada corte;
- Radares: princípio de funcionamento por efeito Doppler. Medem a velocidade de descida do corte;
- Anemômetro: *encoders* que medem a velocidade e a direção do vento na região da rampa;
- Pedais (mantidos os originais): sensores indutivos que identificam presença de eixos dos vagões, determinando o momento exato da leitura de velocidade do primeiro radar. Servem também para contagem de eixos dos vagões presentes em cada linha, incrementando ou decrementando o número de eixos, conforme vão preenchendo ou sendo retirados vagões das linhas do pátio de classificação, respectivamente;
- Circuitos de Via (mantidos os originais): acusam estado de ocupação da via pelos lotes. Estão presentes nas regiões dos pedais, das máquinas de chave e em pontos estratégicos das linhas do pátio de classificação, onde servem para caracterizar os marcos de preenchimento destas linhas;
- Retardadores Eletropneumáticos (mantidos os originais): responsáveis pela frenagem do corte;
- Máquinas de Chave Eletropneumáticas (mantidas as originais): comandadas pelo sistema para alinhar rotas, formam um caminho de modo a conduzir o corte à sua linha de destino.

Os sensores existentes na rampa fornecem as medidas necessárias para o cálculo da rolabilidade<sup>2</sup> de cada corte. Este valor de rolabilidade, junto a outros parâmetros, torna possível o cálculo da velocidade de saída com a qual o corte deve sair dos retardadores, a fim de chegar ao destino com uma velocidade que permita um engate suave. O sistema atua sobre o processo através de retardadores, aplicando aos cortes o grau correto de frenagem.

Atrás dos retardadores existem circuitos de via que detectam a presença dos vagões e pedais que contam o número de eixos. O sistema alinha rotas, agindo no campo sobre máquinas de chave eletropneumáticas, de forma que o corte chegue ao destino preestabelecido.

Operacionalmente, o processo de classificação de vagões pode ser dividido nas seguintes fases que compreendem: o fornecimento de informações sobre os vagões, o cálculo da velocidade de saída, o controle de velocidade, o controle de rotas e a retirada dos lotes do pátio de classificação. Neste trabalho, será tratada, principalmente, a fase do cálculo da velocidade de saída.

### 1.3 Organização da Dissertação

O sistema original do *Hump Yard* atendeu a operação durante uma época de pouco recurso tecnológico, apresentando várias limitações tanto de *hardware* quanto de *software*: utilizava-se grande parte do processamento dos computadores em interfaces com o usuário, sendo que essas, hoje, são transparentes para o sistema. Além disso, a instrumentação de campo necessitava de um tratamento muito trabalhoso em *hardware* para se obter as medições necessárias, i.e., não era utilizado controlador lógico programável e todo o algoritmo de Controle e Supervisão foi desenvolvido em Linguagem Pascal para computadores da época. Tudo isso foi resolvido com a modernização dos equipamentos.

Assim, o projeto de modernização proporcionou aperfeiçoamentos ainda maiores no que diz respeito ao algoritmo de controle, ou seja, de posse de máquinas e recursos com tecnologia de ponta, abriu-se o leque de opções para otimizar o processo. Neste cenário, após vários estudos do sistema, surgiu a idéia de utilizar inteligência computacional no cálculo da velocidade de saída dos vagões e *notch* (nível de frenagem) inicial aplicado, cálculos estes originalmente realizados no algoritmo de controle, por meio de equações e tabelas.

---

<sup>2</sup> Rolabilidade é uma variável obtida a partir de equação matemática, deduzida no Apêndice “A”, que quantifica o movimento dos vagões, considerando a resultante das forças em suas partes girantes.

Além disso, para o estudo do processo e teste da plataforma de *hardware* e *software*, desenvolveu-se um simulador do pátio de classificação, sendo este de fundamental importância para consolidar toda a estrutura elaborada para o projeto. O simulador não só possibilitou os testes de plataforma, mas também deu uma maior confiabilidade ao sistema proposto, eliminando os erros, antes da implantação em campo.

Contudo, este trabalho teve as seguintes etapas durante seu desenvolvimento:

- a simulação do pátio de classificação, incluindo toda sua instrumentação (Capítulo II);
- a modelagem do sistema, utilizando as equações e tabelas originais (Capítulo III);
- a geração de uma base de dados a partir do modelo (Capítulo IV);
- a análise da aplicação de técnicas de inteligência computacional com os dados gerados (Capítulo IV);
- o desenvolvimento do sistema “inteligente” para cálculo da velocidade de saída e *notch* aplicado (Capítulo IV);
- uma proposta de melhoria do projeto original (Capítulo V).

Estas etapas serão, nos capítulos seguintes, fundamentadas teoricamente e analisadas de forma prática.

## CAPÍTULO II – Simulação do *Hump Yard*

### 2.1 Estruturação do Projeto

Para o estudo do sistema e a realização de testes em plataforma, chegou-se à conclusão que, inicialmente, era necessária a elaboração de um simulador que retratasse a dinâmica do sistema o mais próximo possível da realidade, permitindo uma avaliação do algoritmo de controle original e suas limitações e, conseqüentemente, possibilitando o refinamento deste algoritmo através de técnicas mais avançadas de controle. O simulador é uma ferramenta auxiliar para o teste do algoritmo de controle implementado no CLP e faz o papel da planta com todos os sensores e atuadores.

O principal desafio é a implementação em *software*, de forma dinâmica, do movimento de cada corte ao longo de todo o pátio, ou seja, o programa tem que tratar os cortes independentes uns dos outros e seguindo um perfil de velocidade que represente o movimento de cada corte com o trecho no qual está passando, na rampa e no pátio, de acordo com uma aceleração na descida da rampa, uma frenagem aplicada no retardador e uma conseqüente desaceleração a partir deste retardador até o engate final.

Contudo, para esta implementação, apresenta-se como solução viável a utilização de programação *multi-threaded* e como ferramenta o Delphi, comunicando via OPC (*OLE for Process Control*)<sup>3</sup> com o restante dos aplicativos de supervisão e controle.

A seguir (Figura 2.1) é mostrada, de forma esquemática, a estruturação do projeto, situando o simulador neste contexto. É importante observar as comunicações estabelecidas entre os aplicativos desenvolvidos, o que garantiu uma perfeita integração dos mesmos.

<sup>3</sup> OPC é um padrão de comunicação para acesso a dados de tempo real dentro do sistema operacional Windows.

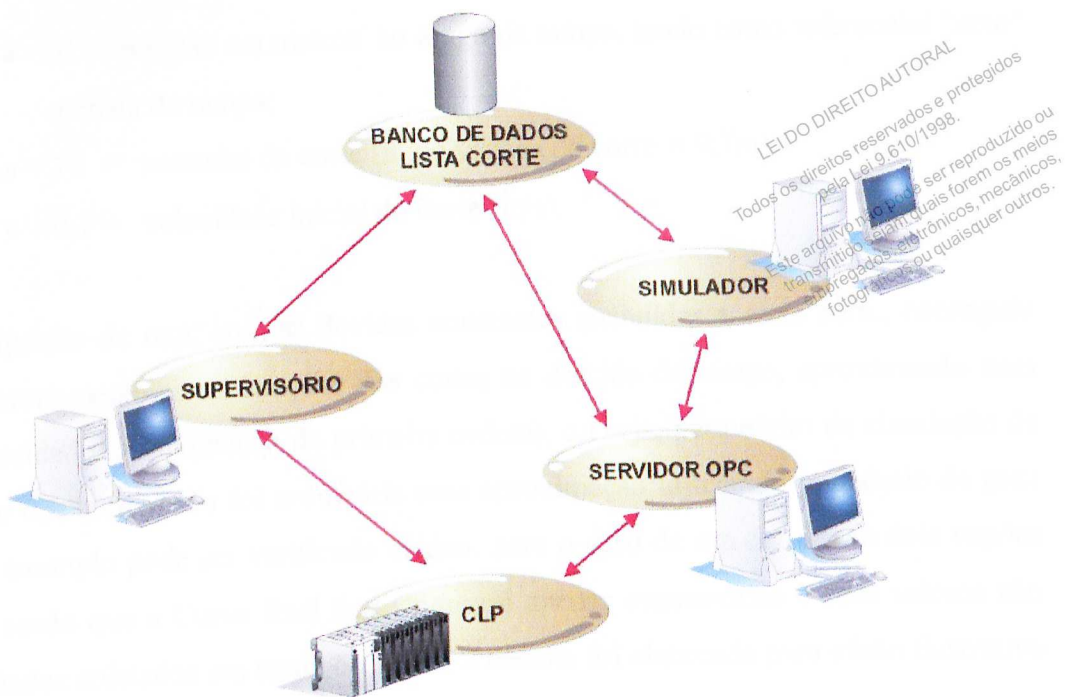


Figura 2.1 – Estruturação do projeto

## 2.2 Implementação do Simulador

O simulador foi desenvolvido e refinado dia-a-dia, ao longo de todo o período de desenvolvimento do projeto, chegando-se a um aplicativo muito próximo do processo real. A planta foi dividida em três trechos distintos (rampa, retardador e pátio), para o caso da rampa foi necessária a utilização de uma equação de velocidade empírica que aproxima a curva real, devido ao fato de este ser o trecho mais crítico para a simulação. Nos outros trechos foram utilizados valores distintos de velocidade obtidos diretamente da curva real do processo. A equação implementada para a rampa foi a seguinte:

$$V = K \times (X - (Tc / 2)) + 0,7 \quad (2.1)$$

Onde:

- $V$  = velocidade do corte (m/s);
- $K$  (constante) = 0,04625  $\Rightarrow$  corte com 02 vagões;  
 0,04975  $\Rightarrow$  corte com 04 vagões;  
 0,05275  $\Rightarrow$  corte com 06 vagões;  
 0,05725  $\Rightarrow$  corte com 08 vagões;  
 0,06375  $\Rightarrow$  corte com 10 vagões;



- $X$  = posição em metros ao longo da rampa, tendo como referencial “zero” a crista da rampa;
- $Tc$  = tamanho do corte ( $n^\circ$  de vagões do corte  $\times 9,7m$ );
- $0,7$  = velocidade inicial do corte (m/s).

Esta equação de reta, com as devidas constantes atribuídas a cada corte, conseguiu simular satisfatoriamente as acelerações dos cortes na descida da rampa, aproximando suas curvas de velocidade (aproximação de primeira ordem), ou seja, para efeito de simulação da movimentação dos cortes, não foi necessária uma aproximação utilizando polinômio de grau superior. Um exemplo pode ser verificado abaixo, para o caso de um corte com dois vagões (Figura 2.2), sendo que a Curva Real desta figura é apenas esquemática e seus valores não representam dados coletados em medições reais, a mesma foi elaborada para efeito ilustrativo da aproximação utilizada na simulação.

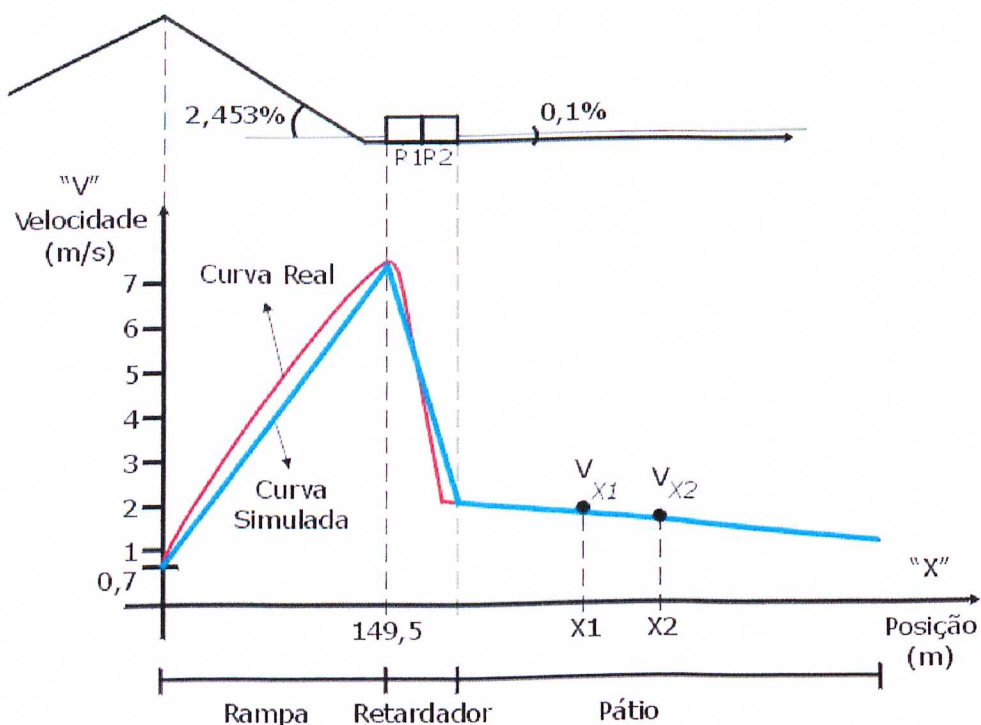


Figura 2.2 – Curva de velocidade de um corte (com 2 vagões)

Na área do retardador a velocidade do corte foi decrementada, também em tempo real, conforme a frenagem aplicada pelo algoritmo de controle. E ao longo do pátio, a velocidade foi decrementada lentamente, conforme cada circuito de via percorrido pelo corte.

Para representar a movimentação no simulador foram calculados e implementados tempos de ocupação e geração de pulsos para cada um dos sensores da planta, seguindo sempre as características de descida de cada corte. Para exemplificar, a seguir será descrita a simulação de um circuito de via no pátio, com o cálculo do tempo de ocupação do mesmo.

Primeiramente é calculado o valor da velocidade média para o circuito de via em questão, com as velocidades  $V_{X1}$  de entrada e  $V_{X2}$  de saída (em m/s) conhecidas previamente através da curva de velocidade do corte (Figura 2.2).

Assim:

$$V_m = (V_{X1} + V_{X2}) / 2 \quad (2.2)$$

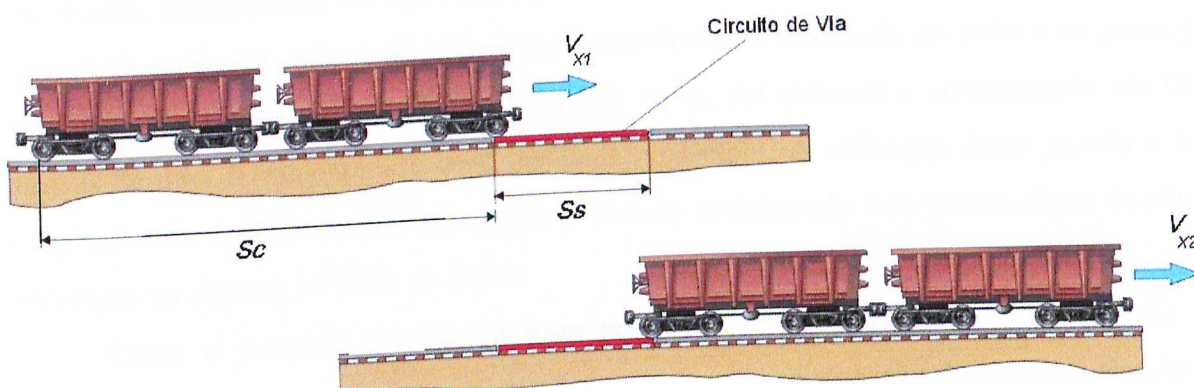


Figura 2.3 – Simulação de um circuito de via

Com o valor de velocidade média e sabendo-se o tamanho do sensor  $S_s$  (em metros) e o tamanho do corte  $S_c$  (em metros), conforme Figura 2.3, é realizado o cálculo do tempo que o circuito de via deve ficar atuado, ou seja:

$$t = (S_c + S_s) / V_m \quad (2.3)$$

O programa então utiliza este tempo para indicar ao CLP que o sensor está atuado, escrevendo o valor booleano “1” na variável relativa ao mesmo, e “zerando” o valor assim que for contado o tempo; esta operação se repete seqüencialmente até se completar a trajetória do corte.



### 2.2.1 Teoria de Programação [16]

Para a simulação de um processo dinâmico de maneira discreta, foi necessária a utilização de vários artifícios. Dentre estes, os mais importantes foram a programação *multi-threaded* e a utilização de eventos. A ferramenta utilizada no desenvolvimento do simulador foi o Delphi da Borland, cuja linguagem é o *Object Pascal*, uma versão orientada a objetos do Pascal tradicional.

Conforme exemplo anterior (Figura 2.3), a simulação do processo em computador consistiu, basicamente, na escrita de variáveis do CLP, que por sua vez, realiza o controle do processo através de seu algoritmo. Os valores enviados para o CLP são relativos ao acionamento ou desacionamento de sensores como, por exemplo, os pedais e os circuitos de via. Porém, existem diversos tipos de valores: desde pulsos com duração mínima de 40 ms, no caso dos pedais, até valores de velocidade instantânea, na simulação do radar e os pesos por eixo, em uma simulação da balança. Para este envio, foi utilizada a comunicação via OPC através de uma ferramenta adicional instalada no Delphi. A utilização deste padrão é bem simples, sendo baseada apenas em alguns passos de inicialização e na escrita direta de alguns endereços no sistema servidor de dados.

Como o processo precisa ser todo seqüencial e intertravado, a simulação de um segundo corte podendo descer a qualquer instante após a desocupação do primeiro circuito de via surgiu a necessidade da transformação de cada corte em uma *thread*, ou seja, uma unidade de execução independente. Uma vez que até cinco cortes poderiam estar sendo classificados ao mesmo tempo, o programa precisaria ser *multi-threaded*. A partir desta idéia, foram criadas as *threads* “Corte”, “Circuito\_de\_Via”, “Balança”, “Trata\_Pedais”, “Gerencia\_Chaves” e “Gerencia\_Semáforos”.

O Delphi permite uma modularização do código em diversas *Units*, de maneira que o código possa ficar mais organizado. Além das *Units* que contêm as *threads* citadas no parágrafo anterior, algumas como a “Principal”, a “Trata\_Falhas” e a “About” foram criadas, cada uma correspondendo a um *Form* (uma janela). Maiores detalhes da programação do simulador são encontrados em [15].



## 2.2.2 Utilização do Simulador

O simulador possui uma tela principal (Figura 2.4) contendo animações de todos os sensores, instrumentos e atuadores do sistema, na qual o operador apenas pressiona o botão START de modo que sejam carregadas as informações iniciais para a simulação, como a leitura da lista de corte, a inicialização das *threads* principais e das variáveis. Após isso, o simulador aguarda o CLASSIFICA, pressionado no supervisório. Em seguida, a classificação se inicia. A partir deste momento, o operador fará o papel do “cortador”, pressionando o botão CORTAR. Assim, ao final da lista de corte, o botão CORTAR escreve TERMINOU e não permite mais ser pressionado.

Além disso, o programa permite a simulação da retirada dos vagões das linhas de classificação, sendo que o número de eixos de vagões, incrementado durante as classificações, é decrementado junto com o número de eixos da locomotiva que puxa a composição.

Para iniciar uma nova classificação, basta reiniciar o simulador.

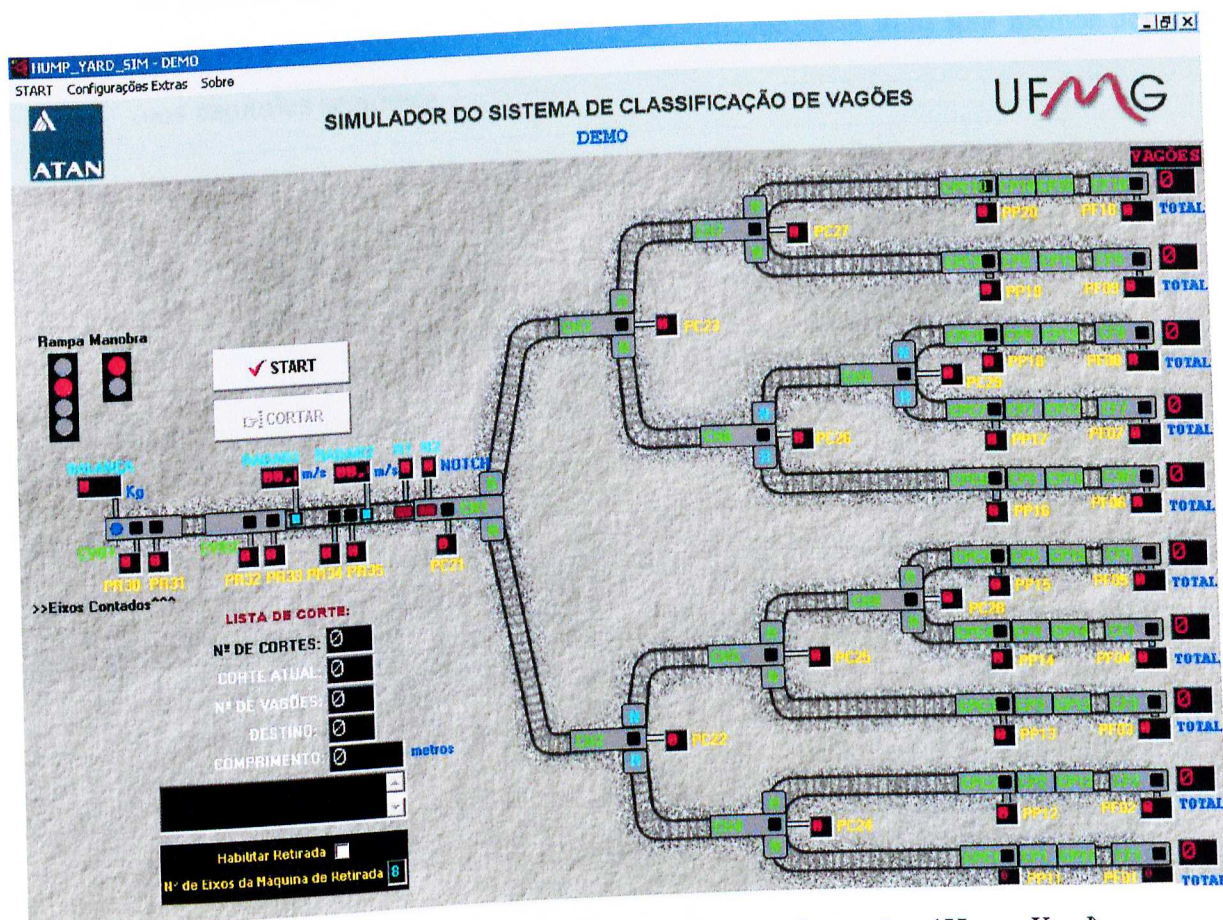


Figura 2.4 – Simulador do pátio de classificação de vagões (Hump Yard)

## 2.3 Resultados Obtidos

Os testes foram bem sucedidos e repetidos inúmeras vezes, no intuito de validar o algoritmo de controle original e propor melhorias. Devido ao fato do simulador modelar toda a instrumentação de campo e funcionalidades do sistema, com sua utilização foi possível testar e validar todo o sistema de supervisão e controle implementado, evitando maiores problemas durante a implantação em campo. Assim, conclusões de suma importância foram obtidas com a utilização do simulador, tais como:

- análise do tempo de resposta do algoritmo de controle original;
- verificação de alarmes gerados pelo sistema;
- teste de funcionalidades implementadas no supervisório;
- teste do algoritmo de roteamento dos cortes;
- e principalmente a verificação da possibilidade de retirada das equações e tabelas de parte do algoritmo de controle original que tratam do cálculo da velocidade de saída do retardador e *notch* inicial a ser aplicado; este item será melhor descrito nos capítulos seguintes.



## CAPÍTULO III – Modelagem do Sistema [7]

### 3.1 Considerações Iniciais

No *Hump Yard*, as equações matemáticas que regem o movimento dos vagões são utilizadas a fim de calcular a velocidade de saída do retardador, para que o corte atinja o ponto de engate com a velocidade especificada, evitando sobrevelocidades (colisões/quebra de engates) e subvelocidades (paradas curtas).

As equações de movimento devem considerar os seguintes fatores:

- trecho a ser percorrido após o retardador não é plano e nem reto (Figura 3.1);
- existem atritos que influenciam o movimento, causados por: material rodante; via em curva e existência de chaves de mudança de via; fricção entre a roda e o trilho; resistência do ar.

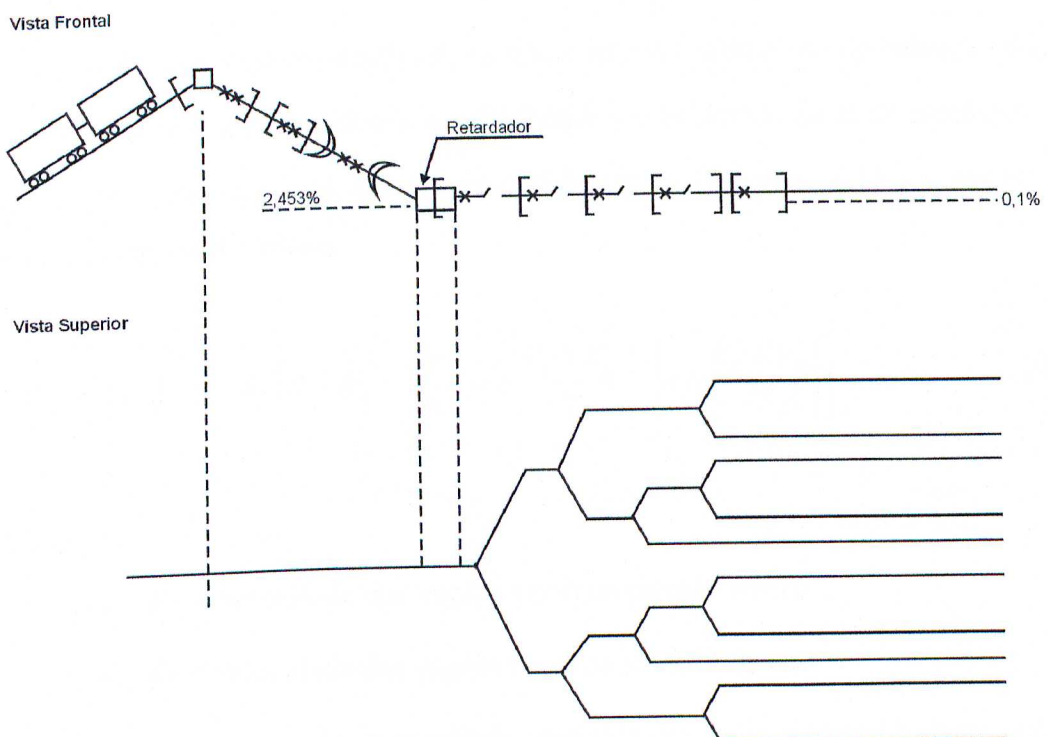


Figura 3.1 – Desenho esquemático do *Hump Yard*

Fonte: ESCA.



A modelagem do sistema baseia-se no cálculo da rolabilidade dos vagões no pátio, dependendo das variáveis físicas medidas pela instrumentação de campo, características do corte e situação do pátio, o que influencia diretamente no cálculo da velocidade de saída dos retardadores e no *notch* aplicado.

As deduções das equações físicas do processo são baseadas no princípio da conservação de energia, ou seja, a energia potencial dos vagões no topo da rampa é convertida em energia cinética durante todo o espaço percorrido até o momento do engate, utilizando-se para isso o método do balanço de energia. Além disso, é importante destacar que o modelo faz uso de todas as forças atuantes no sistema através de um equacionamento das mesmas, isto inclui a consideração das forças devido ao peso e das forças de resistência, possibilitando um equacionamento do movimento dos vagões do sistema.

A seguir são apresentadas as equações da rolabilidade mecânica e velocidade de saída através de medidas em campo, a dedução detalhada destas equações pode ser encontrada no Apêndice “A” deste trabalho.

### 3.2 Cálculo de Rolabilidade Através de Medidas em Campo

De posse de uma instrumentações de campo confiável, com o uso de balança, radares, anemômetro e sensores, pode-se calcular a rolabilidade média devido ao atrito mecânico  $\overline{R}_m$ . A equação já deduzida para este fim é apresentada abaixo (Equação 3.1) e a seguir será melhorada para a aplicação prática.

$$\frac{1}{2}(V_s^2 - V_o^2) = g' \cdot S \cdot \left[ \theta - \overline{R}_m - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_s + V_o}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_s + V_o}{2} \right| \right] \quad (3.1)$$

Onde:

- $V_o$  = velocidade dos vagões (m/s) na posição inicial;
- $V_s$  = velocidade dos vagões (m/s) na posição  $S$ ;
- $g'$  = aceleração da gravidade corrigida devido ao material rodante (m/s<sup>2</sup>);
- $S$  = espaço percorrido ou a percorrer (m);
- $K = 0,06$  (kgf s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>);

- $f$  = área frontal do vagão ( $m^2$ );
- $\theta$  = gradiente da rampa (%);
- $P$  = peso total dos vagões (kg);
- $w$  = velocidade do vento na direção do trecho (m/s), sendo positivo se for contrário ao movimento;

Isolando-se  $\overline{R}_m$  tem-se:

$$\overline{R}_m = \theta - \frac{1}{2 \cdot g' \cdot S} (V_s^2 - V_o^2) - \frac{Kf}{P} \left[ \left( w + \frac{V_s + V_o}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_s + V_o}{2} \right| \right] \quad (3.2)$$

Onde, medindo-se a velocidade em 2 pontos, cuja distância é conhecida e efetuando a leitura da velocidade do vento e peso do corte, pode-se calcular  $\overline{R}_m$ .

O sistema original efetua o cálculo de  $\overline{R}_m$  utilizando os dados de leitura do radar nos pontos relativos aos pedais H e L. Ao detectar o 1º eixo, as velocidades  $V_H$  e  $V_L$  são medidas (Figura 3.2).

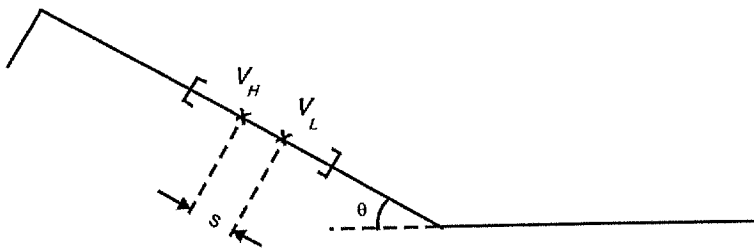


Figura 3.2 – Cálculo da rolabilidade através de medidas em campo

Fonte: ESCA.

Substituindo  $V_H$  e  $V_L$  na Equação 3.2:

$$\overline{R}_m = \theta - \frac{(V_L^2 - V_H^2)}{2 \cdot g' \cdot S} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_L + V_H}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_L + V_H}{2} \right| \quad (3.3)$$

Supondo:

- $\overline{R_m}$ : calculado em (‰) (rolabilidade multiplicada por 1000);
- $\theta$ : fornecido em (‰);
- $P$  = peso total dos vagões (em toneladas);

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sem que sejam os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Tem-se:

$$\overline{R_m} = \theta - \frac{500 \cdot (V_L^2 - V_H^2)}{g' \cdot S} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_L + V_H}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_L + V_H}{2} \right| \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 será, então, utilizada no próximo item para o cálculo da velocidade de entrada na linha de classificação (Equação 3.5) e a seguir (item 3.4) estas equações serão aplicadas no algoritmo do sistema original do *Hump Yard*.

### 3.3 Relação entre a Velocidade de Saída e a Velocidade de Engate

A velocidade de saída do retardador, necessária para que o corte entre na linha de classificação e atinja o ponto de engate (Figura 3.3), com velocidade de engate especificada, pode ser obtida da Equação 3.5, deduzida no Apêndice “A”.

$$\frac{1}{2}(V_s^2 - V_o^2) = g' \cdot S \cdot \left[ \theta - \overline{R_m} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_s + V_o}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_s + V_o}{2} \right| \right] \quad (3.5)$$

Substituindo:  $(V_s^2 - V_o^2)$  por  $(V_s + V_o) \cdot (V_s - V_o)$ , na Equação 3.5, tem-se:

$$\frac{1}{2}(V_s + V_o) \cdot (V_s - V_o) = g' \cdot S \cdot \left[ \theta - \overline{R_m} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_s + V_o}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_s + V_o}{2} \right| \right] \quad (3.6)$$

Multiplicando por  $-1$  e isolando  $V_O$ :

$$(V_O - V_S) = \frac{-g' \cdot S}{\frac{1}{2}(V_S + V_O)} \cdot \left[ \theta - \overline{R_m} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_S + V_O}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_S + V_O}{2} \right| \right] \quad (3.7)$$

$$V_O = V_S - \frac{-g' \cdot S}{\frac{1}{2}(V_S + V_O)} \cdot \left[ \theta - \overline{R_m} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_S + V_O}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_S + V_O}{2} \right| \right] \quad (3.8)$$

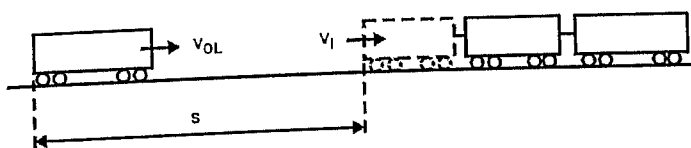


Figura 3.3 – Relação entre a velocidade de saída e a velocidade de engate

Fonte: ESCA.

Definindo:

- $V_O = V_{OL}$ : velocidade de entrada na linha de classificação (m/s);
- $V_S = V_I$ : velocidade de engate (m/s);
- $\overline{R_m}$  e  $\theta$ : fornecido em ( $\text{‰}$ );
- $P$ : em toneladas.

Substituindo  $V_{OL}$  e  $V_I$  na Equação 3.8, tem-se:

$$V_{OL} = V_I - \frac{-g' \cdot S}{\frac{1}{2}(V_{OL} + V_I)} \cdot \left[ \theta - \overline{R_m} - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_{OL} + V_I}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_{OL} + V_I}{2} \right| \right] \cdot 10^{-3} \quad (3.9)$$

Onde:

- $S$ : espaço a percorrer (m);
- $\theta$ : gradiente da linha de classificação ( $\text{‰}$ );
- $\overline{R_m}$ : rolabilidade média devida ao atrito mecânico.

### 3.4 Algoritmo de Controle do Sistema Original

A fim de garantir que o corte saia do retardador com velocidade de saída tal que atinja o ponto de engate com velocidade especificada, utilizando-se as equações obtidas na descrição do Modelo Físico Matemático [7], cabe ressaltar que:

- a equação da velocidade de saída (Equação 3.9) é iterativa, ou seja, dadas  $V_I$  e  $V_{OLtemporário}$  obtém-se uma nova velocidade de saída;
- a rolabilidade média devida ao atrito mecânico ( $\overline{R}_m$ ) varia conforme os valores de velocidade de saída;
- a perda de velocidade na zona de chave de mudança de via devido ao atrito de fricção entre a roda e o trilho necessita ser considerada em função da linha de classificação;
- a distância a percorrer na linha de classificação depende do preenchimento atual da linha.

O sistema de controle original efetua os cálculos de rolabilidade e velocidade de saída, conforme descrito a seguir.

#### 3.4.1 Rolabilidade do Corte

A rolabilidade do corte, devido apenas ao atrito mecânico, é tabelada em função da fórmula de Davis (Equação 3.10), apresentada em [7].

$$R_m = A_0 + R_{AMS} \cdot X + BV + CV^2 \quad (3.10)$$

Para cada linha de classificação e para cada tamanho de corte existem os correspondentes coeficientes  $A_0$ ,  $X$ ,  $B$  e  $C$ , previamente calculados através de testes efetuados.

A componente  $R_{AMS}$  é a rolabilidade média no circuito de distância conhecida, medida nos pedais H e L. Esta é a componente que altera as condições de controle de corte, em função das características do corte sob controle, a fim de evitar paradas prematuras ou sobrevelocidades.

O valor de  $R_{AMS}$  pode ser obtido utilizando-se a Equação 3.4.

A roabilidade  $R_m$  média no trecho  $S$  de velocidade inicial  $V_O$  e final  $V_I$  é definida por:

$$\overline{R_m} = (A_0 + R_{AMS} \cdot X) + B \cdot \left( \frac{V_O + V_I}{2} \right) + C \cdot \left( \frac{V_O + V_I}{2} \right)^2 \quad (3.11)$$

Cabe salientar que  $\overline{R_m}$  é apenas devido ao atrito mecânico, portanto os coeficientes  $A_0$ ,  $X$ ,  $B$ ,  $C$  são tabelados, considerando apenas este atrito, ou seja, medindo em trecho reto e subtraindo a influência do ar nas condições de testes efetuados para obter estes parâmetros.

### 3.4.2 Velocidade de Saída

O método de cálculo de velocidade de saída efetuado pelo *software* é iterativo, constituído dos seguintes passos:

- Passo 1: obtém a velocidade temporária de entrada na linha de classificação  $V_{OLtemp}$  e a velocidade de engate, consultando a Tabela 3.1 em função do estado de preenchimento da linha.

TABELA 3.1

Estado de preenchimento da linha X Velocidade de engate

Preenchimento da linha (nº de vagões)	$V_{OLtemp}$ (m/s)	$V_I$ (m/s)
61 ~ 80	3,2	2,4
41 ~ 60	3,6	2,2
21 ~ 40	4,2	2,1
0 ~ 20	5,0	2,1

Fonte: ESCA.

- Passo 2: corrige a aceleração da gravidade devido ao material rodante.

$$g' = \frac{g}{1 + \frac{0,55N}{P}} \quad (3.12)$$

Onde:  $P$  é o peso por eixo (ton) e  $N$  o número de eixos.

- Passo 3: calcula a distância  $S$  a ser percorrida em função do estado de preenchimento da linha.

- Passo 4: obtém a velocidade média.

$$V_A = \frac{V_{OLtemp} + V_I}{2} \quad (3.13)$$

- Passo 5: calcula a rolabilidade média devido ao atrito mecânico.

$$\overline{R_m} = (A_O + R_{ams} \cdot X) + B \cdot V_A + C \cdot V_A^2 \quad (3.14)$$

- Passo 6: calcula nova velocidade.

$$V_{OL} = V_I + \frac{g' \cdot S}{V_A} \cdot \left[ \theta - \overline{R_m} - \frac{Kf}{P} (w + V_A) \cdot |w + V_A| \right] \cdot 10^{-3} \quad (3.15)$$

- Passo 7: o fim da iteração é determinado por:
  - se  $|V_{OL} - V_{OLtemp}| \leq 0,1$  m/s;
  - se forem executadas 6 iterações;
  - caso as condições não sejam satisfeitas, considera-se  $V_{OLtemp} = V_{OL}$  e executa-se, novamente, a partir do Passo 4.

Ao final das iterações, tem-se como resultado o valor de velocidade de entrada na linha de classificação  $V_{OL}$ , a fim de que o corte atinja o ponto de engate com velocidade de engate  $V_I$ .

- Passo 8: obtém a velocidade de saída do retardador ( $V_O$ ), corrigindo o valor de  $V_{OL}$ , considerando a existência de perda de velocidade na zona de chaves e curvas por:

$$V_O = V_{OL} + \Delta V \quad (3.16)$$

$$\text{sendo } \Delta V = \Delta V_O + (7,0 - V_{OL}) \cdot y \quad (3.17)$$

Onde os valores  $\Delta V_O$  e  $y$  são tabelados, em função de:

- nº de vagões;
- linha de classificação;
- rolabilidade média ( $R_{AMS}$ ).

Ver tabelas atuais do sistema no ANEXO I.

- Passo 9: corrige a velocidade, acrescentando o valor ( $\pm 1.0, \pm 0.6, \pm 0.4, \pm 0.2, 0$ ) fornecido pelo supervisor:

$$V_O = V_O + V_X \quad (3.18)$$

- Passo 10: limita o valor de  $V_O$ , a fim de que fique na faixa de 3m/s a 7m/s:

$$\text{- se } V_O < 3\text{m/s} \rightarrow V_O = 3\text{m/s};$$

$$\text{- se } V_O > 7\text{m/s} \rightarrow V_O = 7\text{m/s}.$$

Contudo, será feita nos itens seguintes, uma análise e validação da substituição de todo este algoritmo apresentado, incluindo equações e tabelas, conforme fluxograma [14] a seguir (Figura 3.4) por uma rede *neurofuzzy*, adaptada e treinada para o sistema.



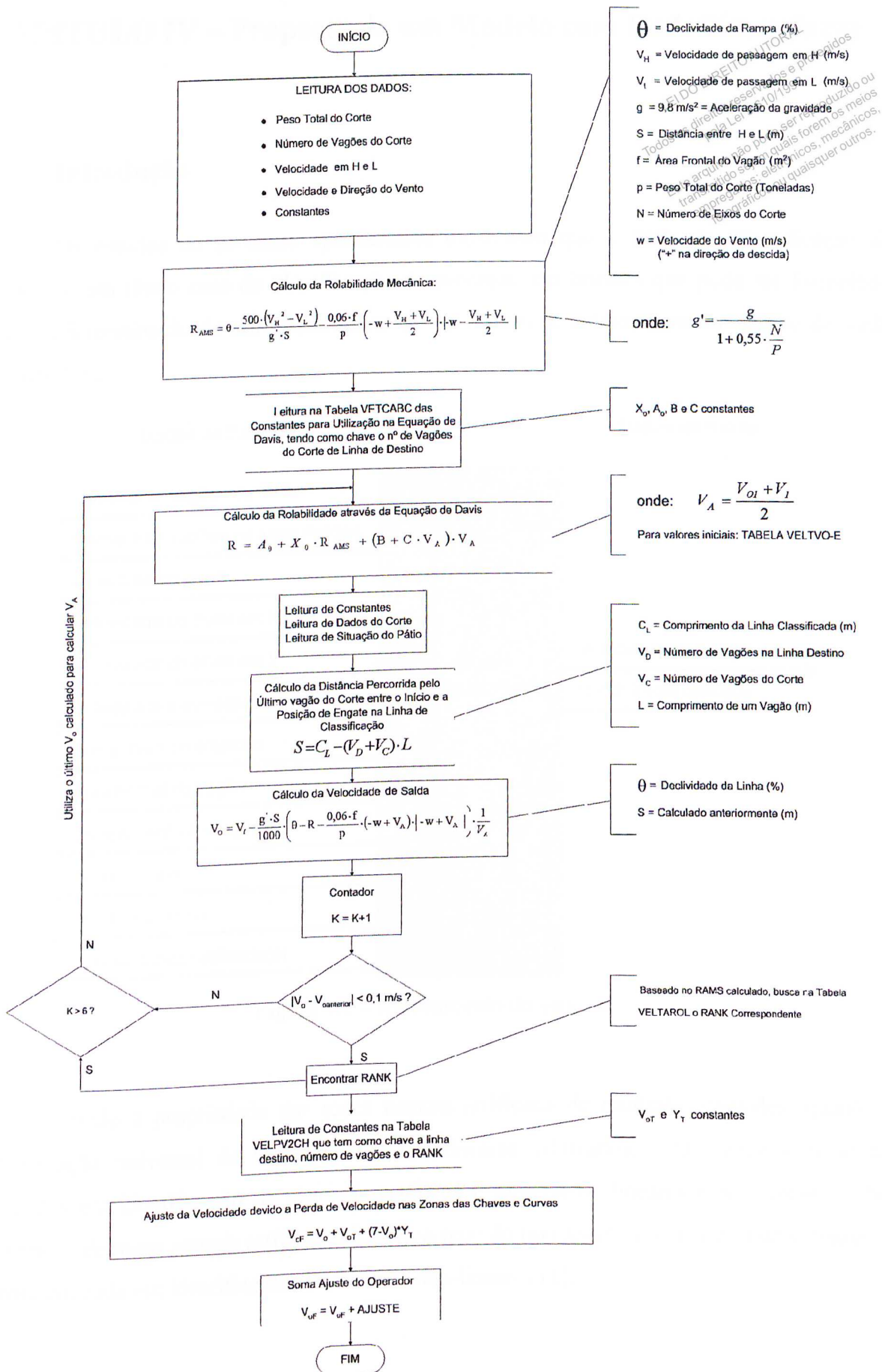


Figura 3.4 – Fluxograma para cálculo da velocidade de saída

## CAPÍTULO IV – Proposta de um Modelo com Rede Neurofuzzy

### 4.1 Introdução

Os estudos do processo apresentados mostraram que o Pátio de Classificação de Vagões é um típico caso de identificação de sistemas não lineares que pode ser formulado como a determinação de um mapeamento de um espaço de entrada para um espaço de saída (Figura 4.1).

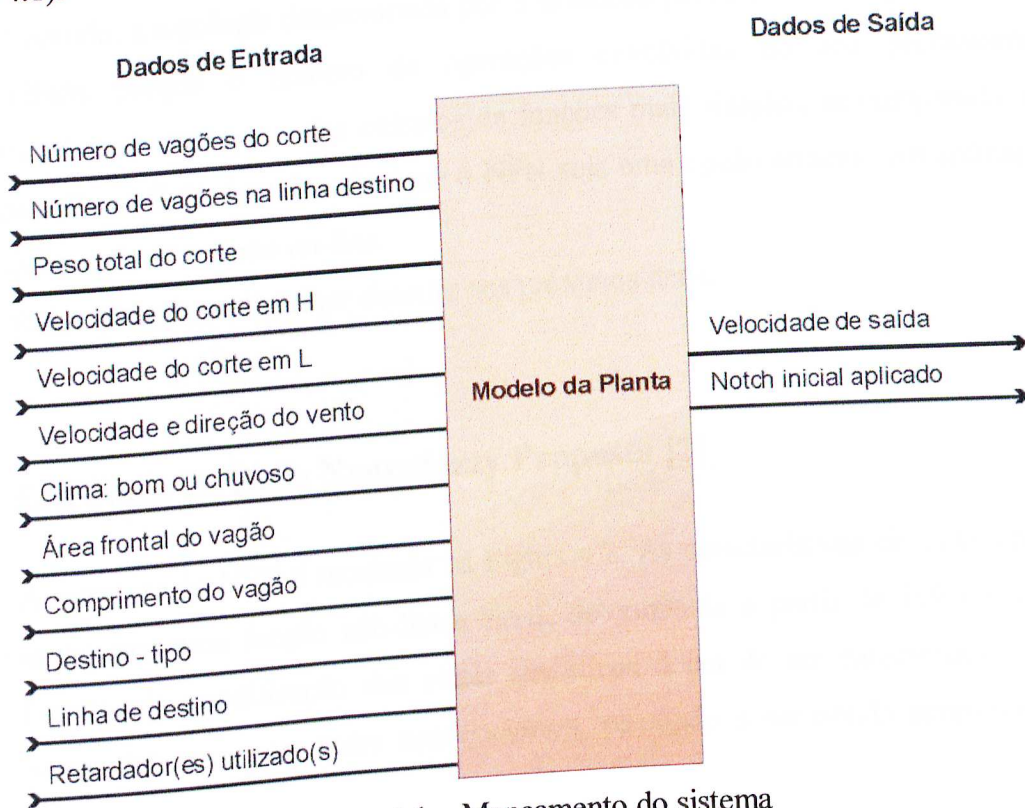


Figura 4.1 – Mapeamento do sistema

Devido à propriedade das redes neurais artificiais de múltiplas camadas, quanto à aproximação universal de mapeamentos não-lineares arbitrários, estas redes vêm sendo utilizadas em identificação de sistemas estáticos e dinâmicos, lineares e não-lineares. Das topologias de redes neurais artificiais (RNA), a rede do tipo *feedforward* com multicamadas é a mais utilizada em identificação de sistemas não-lineares [1].

Uma outra categoria de rede, que também possui a propriedade de aproximação universal, inclui as redes *neurofuzzy* (RNF) [12],[18]. Neste trabalho será utilizado um neurônio *fuzzy*, batizado por *neo fuzzy neuron* (NFN) [22] que, do ponto de vista computacional, apresenta tempo de processamento bastante inferior à estrutura da rede neural multicamada [2]. Vislumbra-se uma aplicação na qual a RNF determina ao CLP os *set-points* de velocidade de saída e *notch* inicial durante a descida do corte, a partir dos valores de entrada do processo (instrumentação de campo, estado da linha e características do corte), ou seja, a RNF determina os corretos *set-points* para o controle atuar no processo, tudo isso, antes que o corte atinja a área de frenagem.

Contudo, a topologia desenvolvida por Yamakawa [22] e otimizada por Caminhas [2] foi escolhida porque o número de operações envolvidas no seu processamento é consideravelmente menor e exige cálculos de funções mais simples, se comparada a outras topologias (Ex.: MLP). Isso faz com que o NFN seja uma opção atraente em aplicações em tempo real e em treinamento *on-line*.

Esta topologia será melhor descrita nos próximos itens.

## 4.2 Estrutura da Rede Neurofuzzy Proposta [2]

A estrutura do NFN é mostrada na Figura 4.2. As características de cada sinapse são representadas por uma função não-linear  $f_i(x_i)$ , determinada a partir de inferência *fuzzy* e defuzzificação. A recodificação dos sinais sinápticos deixa de ser caracterizada por uma função sigmoideal, como nas redes convencionais, passando a ser obtida simplesmente por uma soma algébrica.

Isto faz com que a função erro do NFN seja quadrática e convexa com relação aos pesos que são ajustados durante o seu treinamento e, portanto, o mínimo local é mínimo global.

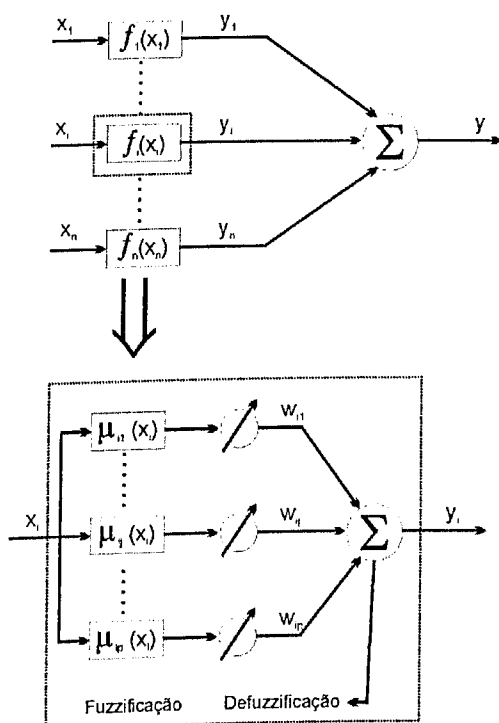


Figura 4.2 – Estrutura do NFN

A saída do NFN pode ser representada pela seguinte equação:

$$y = \sum_{i=1}^n y_i(x_i) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (4.1)$$

Os valores  $y_i$  são determinados a partir de um conjunto de regras *fuzzy* do tipo se-então. Considerando que o universo de discurso da entrada  $x_i$  é dividido em  $p$  partições *fuzzy*, descritas por funções de pertinência mostradas na Figura 4.3, têm-se as seguintes  $p$  regras:

$$\begin{aligned} R_i^1 & \text{ Se } x_i \text{ é } A_{i1} \text{ Então } y_i \text{ é } w_{i1} \\ R_i^2 & \text{ Se } x_i \text{ é } A_{i2} \text{ Então } y_i \text{ é } w_{i2} \\ & \dots \quad \dots \quad \dots \\ R_i^p & \text{ Se } x_i \text{ é } A_{ip} \text{ Então } y_i \text{ é } w_{ip} \end{aligned}$$

Para este conjunto de regras, as variáveis  $x_i$  e  $y_i$  são determinísticas e  $A_{ij}$  são conjuntos *fuzzy*, definidos por  $\mu_{ij}(x_i)$ . Isto exige as etapas de fuzzificação para  $x_i$  e defuzzificação para determinar os valores de  $y_i$ . Considerando funções de pertinência complementares (Figura 4.3), os valores das funções de pertinência são diferentes de zero para, no máximo, duas funções vizinhas. Isto equivale a dizer que, para cada valor da variável de entrada  $x_i$ , no máximo duas das  $p$  regras são ativadas, sendo indexadas por  $k_i$  e  $k_i+1$ . Com isto, utilizando o esquema de inferência *max-min*, mostrado na Figura 4.4, e o centro de gravidade para efetuar a defuzzificação, os valores de  $f_i(x_i)$  podem ser determinados pela Equação 4.2.

$$f_i(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^p \mu_{ij}(x_i) \cdot w_{ij}}{\sum_{j=1}^p \mu_{ij}(x_i)} = \frac{\mu_{ik_i}(x_i) \cdot w_{ik_i} + \mu_{ik_i+1}(x_i) \cdot w_{ik_i+1}}{\mu_{ik_i}(x_i) + \mu_{ik_i+1}(x_i)} \quad (4.2)$$

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sem a qual forem os  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Como as funções de pertinência são complementares, a soma de duas funções sucessivas é igual a 1. Portanto, tem-se a seguinte expressão:

$$f_i(x_i) = \mu_{ik_i}(x_i) \cdot w_{ik_i} + \mu_{ik_i+1}(x_i) \cdot w_{ik_i+1} \quad (4.3)$$

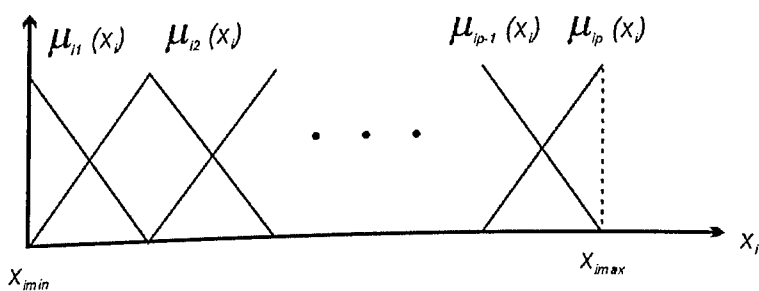


Figura 4.3 – Funções de pertinência

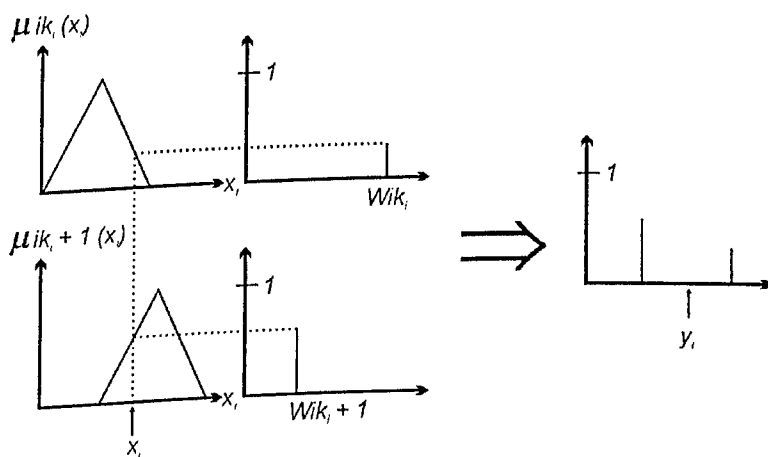


Figura 4.4 – Mecanismo de inferência do NFN



### 4.3 Aprendizado da Rede Neurofuzzy [2]

Como visto anteriormente, somente ramos ativados são relevantes para o processamento da rede. Assim, só um ou dois pesos correspondentes aos ramos ativados são ajustados durante o treinamento do NFN. Este mecanismo sugere que um NFN deva exibir período de treinamento muito menor do que redes neurais convencionais.

De forma similar à rede neural, o método de aprendizagem do NFN consiste em ajustes de seus parâmetros e funções. Será adotado o aprendizado supervisionado, onde somente serão ajustados os parâmetros  $w_{ij}$ , conseqüentes das regras *fuzzy* que, daqui em diante, serão chamados de pesos. Isto porque o ajuste dos valores modais das funções de pertinência implicaria em minimização de funções com mínimos locais, podendo comprometer a convergência do algoritmo de treinamento.

O procedimento de atualização dos pesos consiste em uma atualização incremental e o algoritmo de treinamento consiste na atualização destes pesos, para cada padrão de entrada, de forma a minimizar o erro através do método mais simples: o do gradiente.

A função do erro será não-linear onde a convergência para a solução ótima depende do ponto inicial, da direção de busca e do tamanho do passo (taxa de aprendizado). Para a NFN proposta, a condição inicial será nula, sem comprometer a convergência do algoritmo.

O tamanho do passo, que no caso de treinamento de redes neurais ou *neurofuzzy* é chamado de taxa de aprendizado, pode ser determinado empiricamente, utilizando algum método de busca unidirecional indireto (por exemplo, secção áurea, Fibonacci e outros) ou direto (fazendo aproximação polinomial para a função a ser minimizada). Aqui será proposta uma alternativa para obtenção da taxa de aprendizado, a partir do resultado de uma expressão fechada. Esta utilizará o método do gradiente e os pesos do NFN que proporcionam erro de aproximação nulo, podendo ser determinados em um passo. Assim, independente da condição inicial, é possível encontrar pesos em que o erro seja nulo para o padrão apresentado.

### 4.4 Geração de um Banco de Dados do Sistema

Com a modelagem e identificação do sistema proposto, utilizando rede *neurofuzzy*, o passo seguinte foi a geração de um Banco de Dados que representasse os inúmeros casos possíveis de ocorrer com os cortes, tomando o cuidado de gerar dados consolidados e que possibilitassem a extração de conhecimento se aplicadas técnicas de inteligência computacional, especificamente sistemas nebulosos.

Analisando-se as possibilidades de geração de uma base de dados do processo, verifica-se que a única maneira possível além da utilização do modelo físico do processo, é a aplicação do conhecimento dos operadores da planta, que com suas experiências indicariam os *set-points* para cada corte e o sistema, então, com as informações coletadas em um Banco de Dados poderia treinar a RNF. Esta alternativa não está sendo abordada no desenvolvimento do trabalho, mas como será visto no item 5.3 é tratada como uma proposta de continuidade.

O modelo físico do processo, utilizando equações e tabelas, atendeu o projeto original do *Hump Yard*, numa época de pouco recurso computacional, quando a utilização de consulta em tabelas era a única alternativa para cobrir as várias possibilidades apresentadas. Se analisado hoje, o modelo mostra-se pouco flexível, não possibilitando adaptações para novas situações possíveis de ocorrer, porém, o mesmo é necessário como ponto de partida para o treinamento da RNF. Assim, foi utilizado o fluxograma (Figura 3.4) do algoritmo original como base para o desenvolvimento de um gerador de dados. Este fluxograma contempla todas as etapas do cálculo da velocidade de saída do retardador, variável controlada que é o objetivo final do controle.

O modelo será descrito brevemente para um melhor entendimento do algoritmo original do *Hump Yard*. Temos, portanto, as seguintes etapas para o cálculo da velocidade de saída:

- Leitura dos dados do corte, peso, velocidades e constantes físicas;
- Cálculo da rolabilidade mecânica;
- Leitura de constantes em tabela para utilização na equação de Davis;
- Cálculo da rolabilidade através da equação de Davis;
- Leitura de constantes físicas, dados do corte e situação do pátio;
- Cálculo da distância percorrida pelo último vagão do corte, entre o início e a posição de engate na linha de classificação;
- Cálculo da velocidade de entrada da linha;
- Leitura de constantes em tabela;
- Ajuste da velocidade de saída devido à perda de velocidade nas zonas de chaves e curvas;
- Soma de ajuste do operador (no caso nulo);
- Retorna o valor da velocidade de saída final dos retardadores.

O valor do *notch* inicial a ser aplicado é obtido com a velocidade de saída final através da busca em uma outra tabela (vide ANEXO I).

Dessa forma, o algoritmo retorna o valor de *set-points* a serem utilizados pelo controle de velocidade, utilizando os retardadores. Levantando-se as variáveis significativas para o processo, de acordo com o algoritmo original, a determinação das saídas de velocidade de saída final e *notch* inicial aplicado seria baseada nas seguintes variáveis:

- Número de vagões do corte;
- Número de vagões na linha destino;
- Peso total do corte em (ton);
- Velocidade de passagem no sensor H em (m/s);
- Velocidade de passagem no sensor L em (m/s);
- Velocidade e direção do vento em (m/s) com sinal + ou - ;
- Clima: bom ou chuvoso;
- Destino-tipo, conforme necessidade de manutenção;
- Linha de destino;
- Retardador(es) utilizado(s).

Estas variáveis foram cuidadosamente estudadas, respeitando-se os padrões do sistema e estabelecendo-se faixas de valores dentro dos quais elas poderiam realmente existir, tudo isso sendo baseado nas equações do simulador.

No intuito de verificar a aplicabilidade da topologia proposta, utilizando-se as tabelas e equações do algoritmo original, foi desenvolvido um programa em Delphi (Figura 4.5) para simular, aleatoriamente, cortes sendo classificados e gerar uma massa de dados que possibilitasse a implementação do aprendizado de uma rede, baseando-se no fato de que todos os cortes foram classificados com velocidade de engate correta.

CALCULA Vo - Hump Yard  
 Inicializar

**GERADOR DE DADOS DO HUMP YARD**

ATAN UFMS

LEIDO  
 Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei nº 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou transmitido sem a qualificação dos meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos ou quaisquer outros.

**Nº Vagões do Corte:** 10  
**Nº Vagões na Linha-Destino:** 4  
**Peso Total do Corte (ton):** 176,29000  
**VL - Vel. em TD32 (m/s):** 2,87100  
**VH - Vel. em TD33 (m/s):** 3,90249  
**w - Vel. e Dir. do Vento (m/s):** 3  
**Clima:** CHUVOSO  
**Área Frontal do Vagão (m<sup>2</sup>):** 3  
**Comprimento do Vagão (m):** 9,7  
**Destino Tipo:** 1  
**Linha de Destino:** 2  
**Retardador(es) Utilizado(s):** 2  
**Qualidade da Classificação:** BOA

**RAMS - Rolabilidade Mec.** 4,48204  
**B - Rolabilidade (Davis)** 3,56199

**VO - Velocidade**  
 Iteração 1: 6,50220  
 Iteração 2: 5,92888  
 Iteração 3: 6,11869  
 Iteração 4: 6,05243  
 Iteração 5:   
 Iteração 6:   
**VO FINAL:** 6,57621  
**NOTCH INICIAL:** 3

**Data atual:** 03/09/03  
**Data de Início:** 03/09/03  
**Hora atual:** 13:44:04  
**Hora de Início:** 13:43:26

**STATUS**  
 Número de Simulações Desejadas: 1000  
**Execução:** 0 / 1000  
 Gerar Arquivo  
 Calcular

Figura 4.5 – Gerador de dados do *Hump Yard* (Calcula\_Vo)

O programa foi todo baseado no algoritmo de controle original, com suas equações e tabelas e consolidado, cuidadosamente, de acordo com as particularidades do sistema, tais como:

- geração de velocidades aleatórias dentro de uma faixa de valores possíveis;
- peso lido de acordo com padrões existentes, com pequenas variações para tornar o sistema mais real;
- foi respeitado o número de vagões na linha de destino somados com o do corte, de modo que nunca fosse ultrapassado o número de 80 vagões;
- número de vagões dos cortes, sempre respeitando os padrões de 2, 4, 6, 8 ou 10.



## 4.5 Análise do Banco de Dados Gerado

O Banco de Dados gerado pelo aplicativo foi composto da seguinte forma:

TABELA 4.1  
Composição do Banco de Dados

Simulação	Dados de Entrada (Gerados)											Dados de Saída (Calculados)	
	Número de Vagões	Nº de Vagões Classificados	Peso Total do Corte (ton)	Velocidade em H (m/s)	Velocidade em L (m/s)	Vel. e Dir. do Vento (m/s)	Clima (bom = 0 e chuvoso = 1)	Destino-Tipo (1 a 8)	Linha de Destino (1 a 10)	Retardador em Uso (1, 2 ou ambos)	Notch Inicial Aplicado (1 a 4)	Velocidade Final (m/s)	
1	10	48	155,56	2,87	3,90	-4	1	6	2	1	3	4,96	
2	2	6	29,88	4,89	5,59	-7	0	1	2	1	1	5,41	
3	8	36	103,39	3,35	4,26	2	1	6	8	3	2	5,07	
4	10	38	161,84	2,87	3,94	4	0	7	6	2	3	4,94	
5	6	58	97,34	3,91	4,70	8	0	1	8	2	2	4,51	
6	2	44	27,70	4,79	5,45	0	1	1	2	3	1	4,50	
7	8	54	99,14	3,35	4,26	2	1	6	9	3	2	4,36	
8	6	28	120,96	3,83	4,69	7	0	5	7	1	2	5,07	
9	2	4	43,13	4,89	5,53	7	1	5	3	3	1	5,79	
10	2	52	31,47	4,84	5,49	3	1	8	5	2	1	4,34	
11	4	18	60,67	4,27	5,00	-9	0	7	8	2	1	5,69	
12	8	8	112,70	3,42	4,36	8	0	6	8	3	2	5,46	
13	2	4	43,13	4,89	5,53	7	1	5	3	3	1	5,79	

Com isso, é possível uma análise prévia dos dados, no intuito de extrair algum tipo de informação relevante para o sistema. É importante lembrar que todos os dados foram gerados aleatoriamente, o que possibilitou uma cobertura de todos os casos.

A seguir, são mostrados gráficos com 10000 simulações, os quais poderão mostrar melhor as conclusões após análise do Banco de Dados.

O primeiro (Figura 4.6) representa a Velocidade de Saída Final X Número de Vagões Classificados. Neste, verifica-se que, quanto menores os valores de preenchimento de linha (número de vagões classificados), maiores serão os valores de velocidade de saída, ou seja, os vagões terão de percorrer distâncias maiores no caso de linhas vazias, sendo então necessárias velocidades maiores na saída do retardador. No caso de linhas cheias, o inverso é válido, ou seja, as velocidades de saída do retardador serão menores.



O segundo gráfico (Figura 4.7) mostra o *Notch* Inicial Aplicado X Peso Total do Corte. Isto permite concluir que, quanto maior a massa, maior deverá ser a frenagem inicial.

A análise destes dados nos mostrou que os mesmos foram levantados com pouca precisão, a partir de um universo pequeno de medições reais, limitadas pela forma de realização dos testes em campo.

Porém, estas análises permitem validar os dados tabelados do sistema original. Sendo esta crucial para concluir que estes dados podem servir, inicialmente, como fonte para a extração de conhecimento e conseqüente utilização de inteligência computacional.

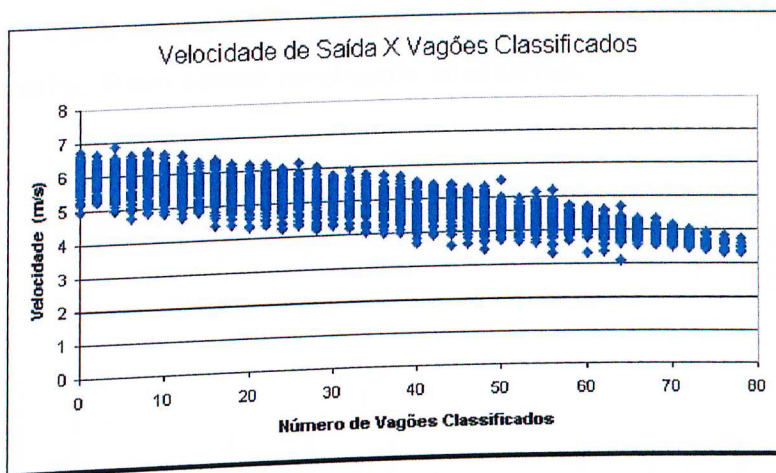


Figura 4.6 – Velocidade de saída X vagões classificados

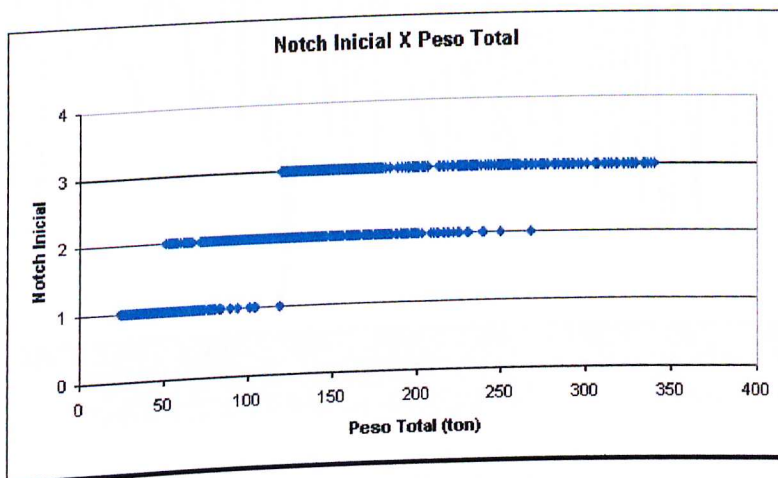


Figura 4.7 – *Notch* inicial aplicado X peso total do corte

É importante lembrar que todo erro de tabela ou falha na concepção do algoritmo original foi retratado nesta configuração inicial. Porém, isto seria sanado com os dados obtidos no processo, através de um sistema adaptativo. O Banco de Dados real do processo poderia realimentar o controle, permitindo um refinamento ao longo do tempo.

## 4.6 Primeiras Análises com o MATLAB®

No intuito de concretizar toda a pesquisa realizada neste trabalho, o próximo passo foi a comprovação prática, utilizando a rede *neurofuzzy* proposta. Dessa forma, buscou-se inicialmente a realização de testes com o MATLAB®, ferramenta ideal para as primeiras experiências. Basicamente, a idéia foi utilizar uma massa de dados gerada pelo programa da Figura 4.5 com 10.000 simulações aleatórias e consistentes para treinar a rede e, depois, de posse deste treinamento, validar a rede com outras 10.000 simulações também aleatórias e consistentes, com dados diferentes dos originalmente utilizados no treinamento. Contudo, serão mostrados a seguir alguns gráficos (Figuras 4.8 e 4.9) com estas respostas da rede que, numa primeira análise, foram consideravelmente satisfatórias.

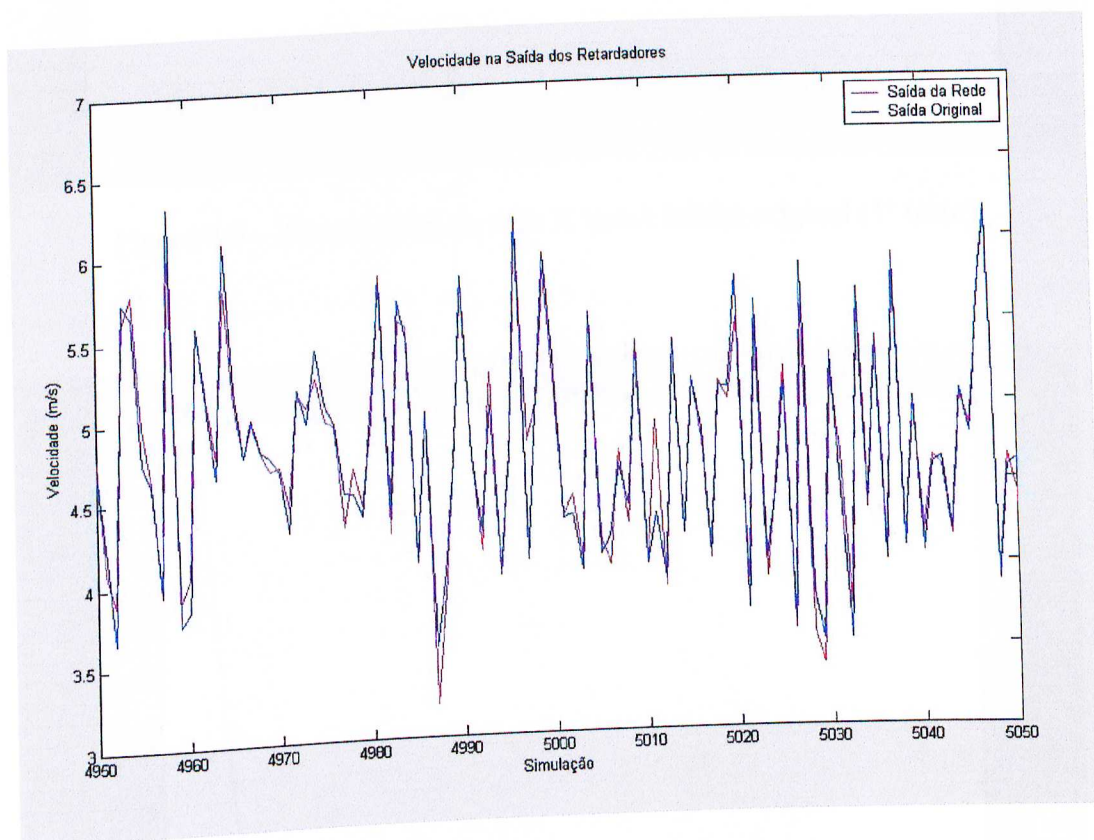


Figura 4.8 – Velocidade de saída da rede X velocidade de saída original (1º teste)

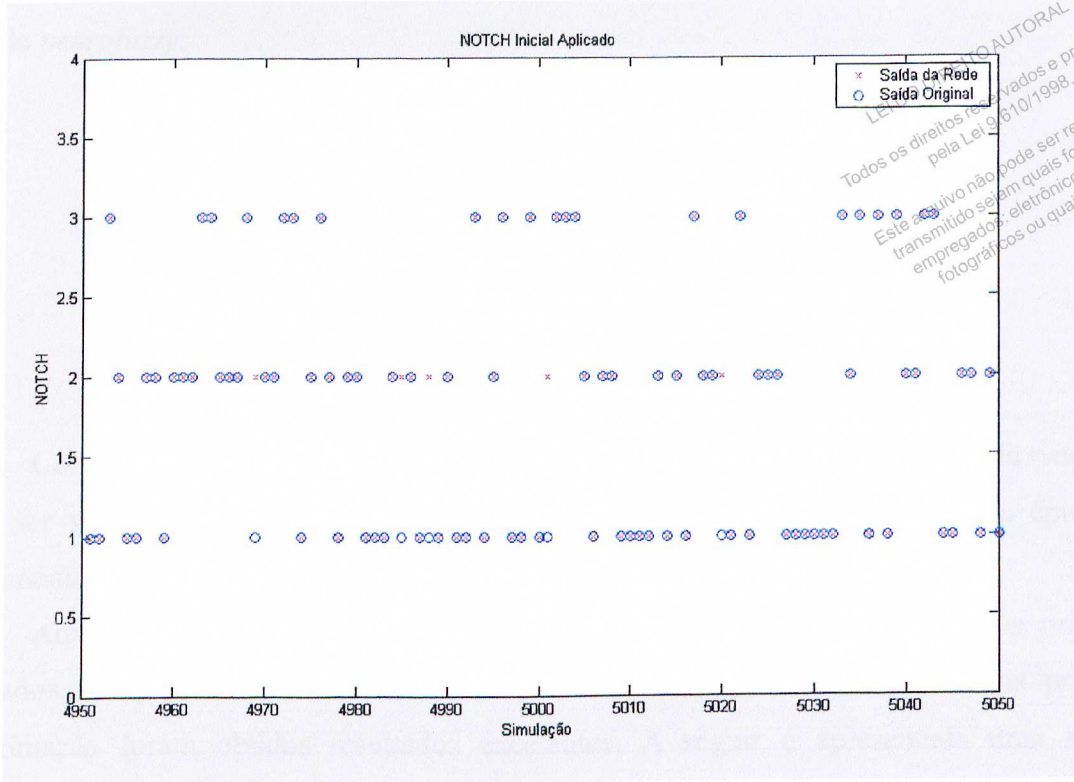


Figura 4.9 – *Notch* inicial da rede X *notch* inicial original (1º teste)

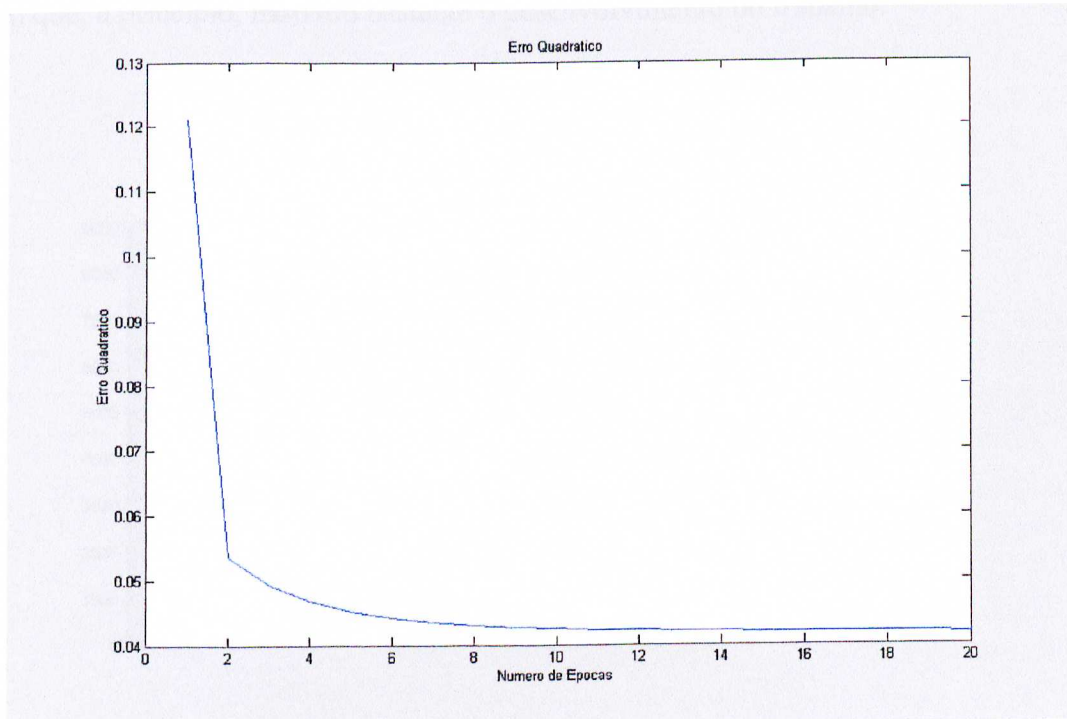


Figura 4.10 – Erro quadrático (1º teste)



Para as respostas anteriores foram utilizados os seguintes parâmetros de configuração da rede *neurofuzzy*:

- número de conjuntos por variável = 10;
- taxa de aprendizado = 0,01;
- número máximo de épocas = 100;
- erro quadrático médio desejado =  $1,0 \times 10^{-3}$ .

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Com essa parametrização houve uma rápida convergência do treinamento da rede. Isso pode ser verificado pela Figura 4.10, que mostra o Erro Quadrático em cada época de treinamento.

Analisando as respostas de velocidade de saída da rede com os dados originais desejados, foi possível verificar que a proposta era válida, uma vez que numa primeira aproximação foram obtidos resultados excelentes. A seguir é apresentada uma análise comparativa por histograma, mostrando os erros percentuais para a saída da rede x saída original. A Figura 4.11 mostra que 84,86% das repostas da rede apresentavam erro menor que 5% se comparadas aos valores desejados e que apenas 2,93% apresentavam erro acima de 10%, o que, a princípio, motivou bastante o desenvolvimento do trabalho.

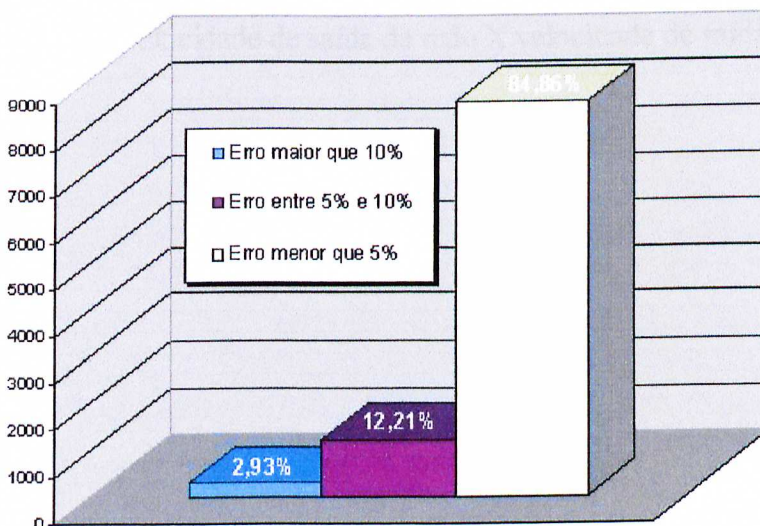


Figura 4.11 – Comparação dos erros percentuais (1º teste)

Numa segunda análise, foram filtrados os 8000 melhores resultados, ou seja, dados com os menores erros apresentados. De posse desses dados, os mesmos foram novamente posicionados de forma aleatória. Em seguida, as 4000 primeiras simulações foram utilizadas para o treinamento, com os mesmos parâmetros anteriores e as 4000 últimas para a validação. A seguir, é mostrado através de gráficos (Figuras 4.12 e 4.13), os resultados deste teste.

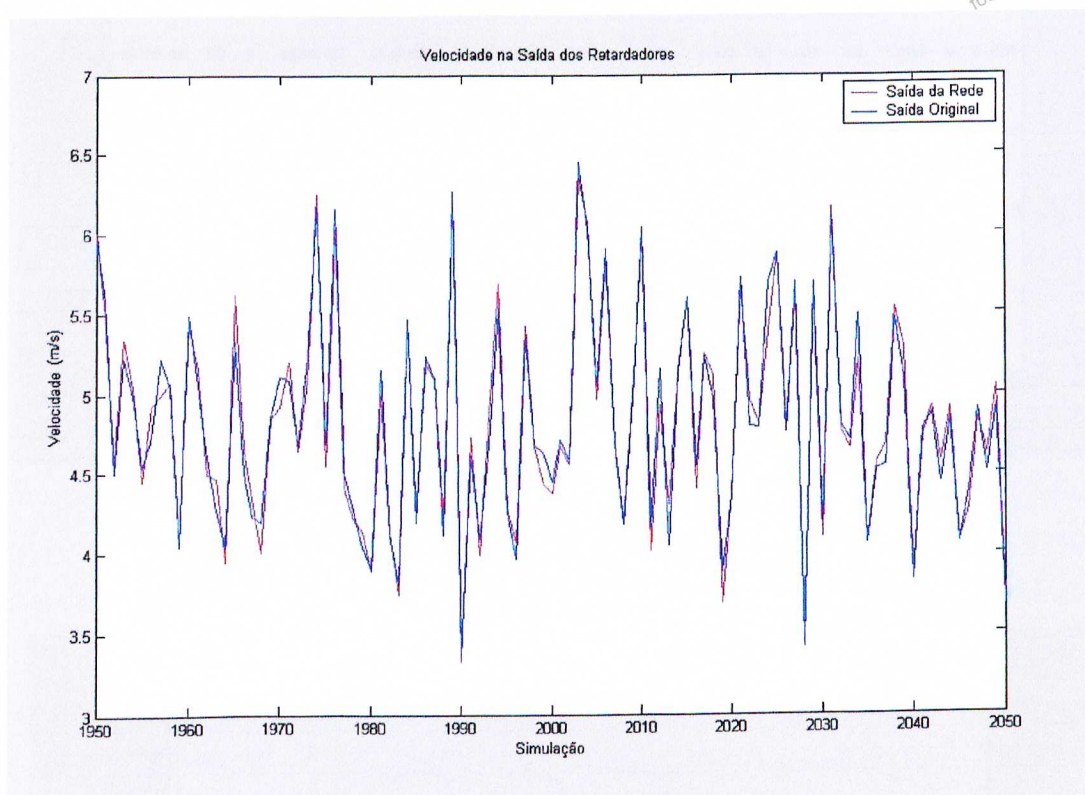


Figura 4.12 – Velocidade de saída da rede X velocidade de saída original (2º teste)



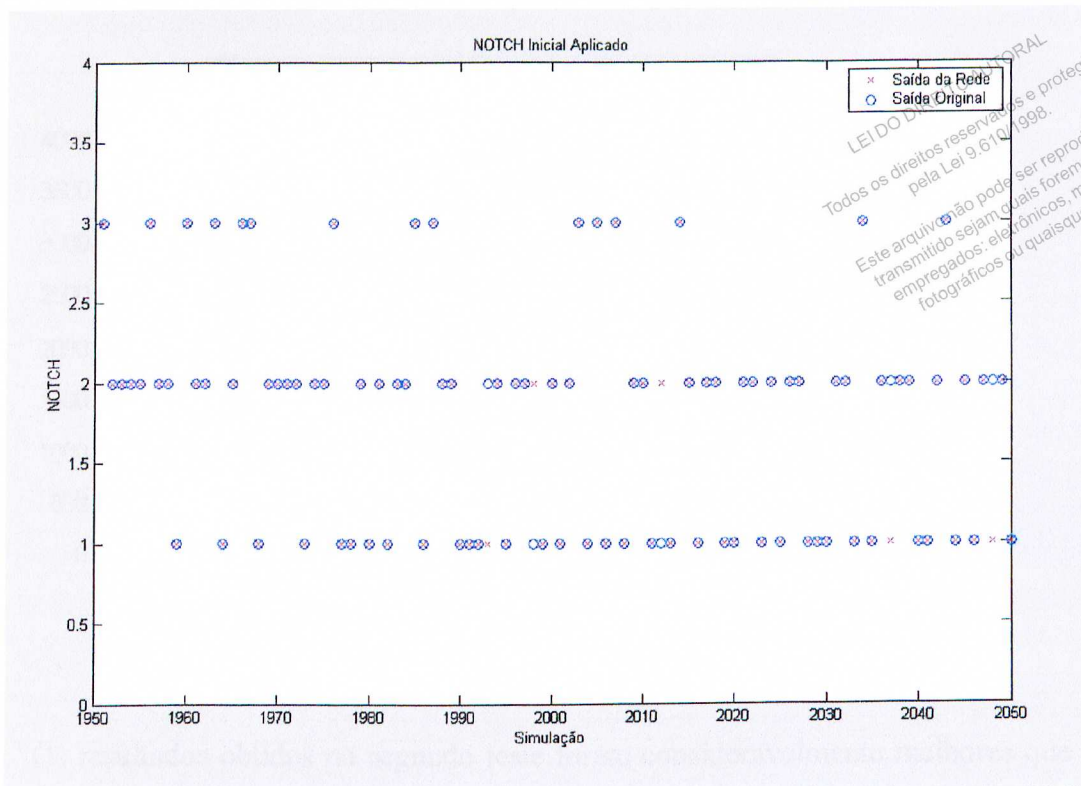


Figura 4.13 – *Notch* inicial da rede X *notch* inicial original (2º teste)

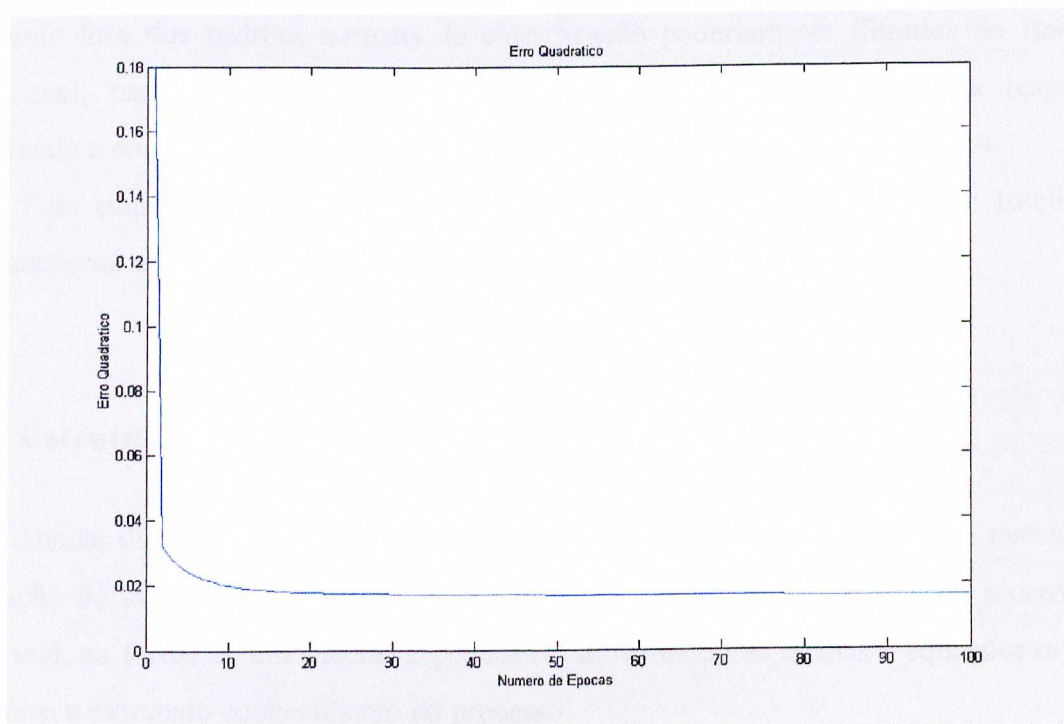
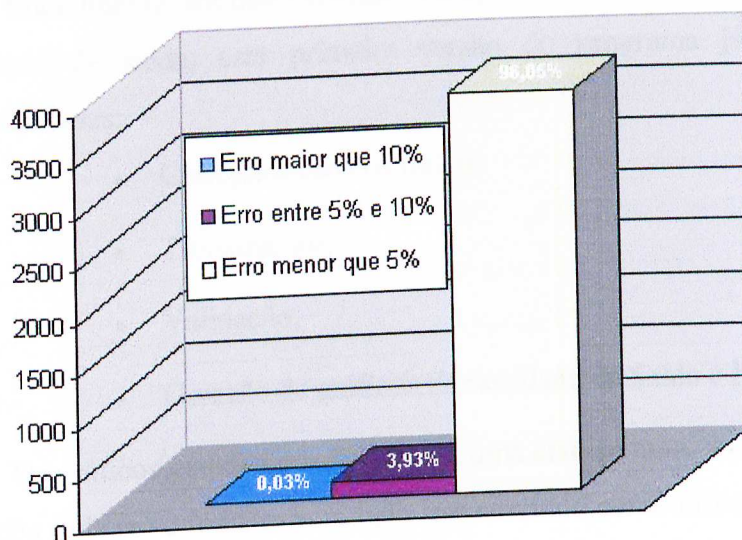


Figura 4.14 – Erro quadrático (2º teste)



LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Figura 4.15 – Comparação dos erros percentuais (2º teste)

Os resultados obtidos no segundo teste foram consideravelmente melhores que os do primeiro, conforme pode ser constatado no histograma da Figura 4.15, provando que a resposta da rede pode ser otimizada, não só do ponto de vista de seus parâmetros, mas também da qualidade dos dados utilizados para o treinamento. Numa aplicação prática, dados totalmente fora dos padrões normais de classificação poderiam ser filtrados no Banco de Dados real, para os próximos treinamentos, evitando erros grosseiros na resposta e melhorando a convergência para o erro quadrático desejado, conforme Figura 4.14.

Esta etapa da pesquisa motivou e garantiu a aplicação de técnicas de Inteligência Computacional ao caso do *Hump Yard*.

#### 4.7 Estruturação e Desenvolvimento do Aplicativo em Delphi

Diante dos resultados obtidos a partir do programa em MATLAB<sup>®</sup>, foi necessária a elaboração de um produto final que, posteriormente, pudesse ser utilizado no processo em tempo real, na forma de um sistema especialista, substituindo as tabelas e equações originais do sistema e extraindo conhecimento do processo.

Devido ao fato de que no projeto de modernização do *Hump Yard* foram desenvolvidos alguns aplicativos em Delphi, optou-se pela implementação da rede *neurofuzzy* na mesma plataforma, possibilitando uma fácil integração ao novo sistema.



Inicialmente, foi desenvolvido um aplicativo apenas para aprendizado e validação da velocidade de saída, esta primeira versão do programa já contemplava as seguintes funcionalidades:

- Carregamento dos dados;
- Treinamento;
- Validação;
- Geração de gráficos (Velocidade de Saída e Erro Quadrático).

Os gráficos gerados possibilitavam uma análise minuciosa e a validação da resposta da rede após cada novo treinamento, tudo isso servindo como forma de demonstrar o aplicativo.

Numa segunda etapa, o programa foi aprimorado para as duas saídas e passou-se a gerar também o gráfico do *notch* inicial aplicado.

Para a utilização do aplicativo, na forma de um produto integrado ao Sistema de Controle e Supervisão do *Hump Yard*, é necessário uma resposta rápida em tempo real a cada nova batelada, isto é, nova descida de corte. Durante o processo, é feita uma leitura dos dados do Banco e instrumentações de campo e, em seguida, é passado o valor de velocidade de saída + *notch* inicial ao controle de velocidade. Isso tudo só é possível caso a rede já esteja treinada e pronta para responder a cada novo corte. Dessa forma, é imprescindível a gravação dos pesos da rede em arquivo, flexibilizando o sistema. Pesos estes que também poderão ser adaptados a cada novo conjunto de dados para treinamento. Porém, no momento necessário, a rede apenas fará a leitura dos pesos atuais para efetuar os cálculos. O aplicativo grava em arquivo texto os referidos pesos e os disponibiliza para cada novo processo de corte.

Contudo, o aplicativo foi preparado também para a utilização em tempo real. O usuário pressiona o botão de calcular, inicia um evento que lê os dados gerados aleatoriamente, carrega os pesos na memória a partir do arquivo gravado, calcula a velocidade de saída e *notch* inicial para os referidos dados e, finalmente, disponibiliza os dados e respostas na tela, mostrando, inclusive, o erro percentual de cada saída. Isso torna a demonstração mais interativa com o usuário, permitindo análises cada vez mais criteriosas do sistema.

Na aplicação prática, o operador do Sistema de Controle e Supervisão não teria acesso a estes dados, porém o seu conhecimento seria utilizado para efetivar o treinamento da rede, ou seja, a cada novo corte, o operador poderia se necessário intervir no valor de *set-point*, e sabendo a qualidade da classificação (boa ou ruim), poderia informá-la ao sistema que passaria a armazenar este novo dado no Banco, permitindo um futuro retreinamento da RNF.

Um fator de suma importância, discutido durante todo o desenvolvimento do aplicativo utilizando rede *neurofuzzy*, diz respeito ao tempo de resposta do programa quando o mesmo fosse solicitado. Porém, é provado que a topologia Yamakawa [22] apresenta baixo tempo de resposta, tornando uma opção atraente em aplicações de tempo real e em treinamento *on-line*. Assim, a única possibilidade de atraso na utilização do aplicativo estaria no tráfego da Rede Ethernet e nas leituras e escritas no Banco de Dados e no Servidor OPC. Entretanto, após análises no local, com a planta em funcionamento, estes tempos estão dentro do admitido pelo sistema (menores do que 1s), tornando a solução totalmente plausível em aplicação de tempo real.

A seguir, é apresentada a estrutura final do aplicativo desenvolvido em Delphi (Figura 4.16), com as suas respectivas funções, representadas na forma de um diagrama de blocos.

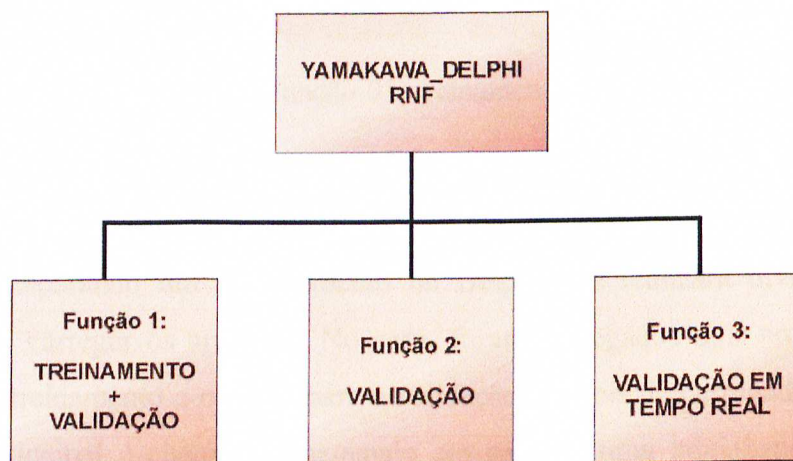


Figura 4.16 – Estrutura do programa Yamakawa\_Delphi

A Figura 4.16 faz referência às três funções principais do programa. A primeira função é destinada a um novo treinamento da rede, a partir de um Banco de Dados fornecido. Essa função é necessária apenas para uma inicialização do programa quando não existe um arquivo contendo os pesos, quando se fizer necessário, por algum motivo, um novo treinamento da rede. Ela irá treinar a rede e, em seguida, validar o treinamento.



A segunda função é utilizada para a validação, porém sem treinamento. Para isso, é necessário que exista um arquivo contendo os pesos da rede. Ela é interessante por ser mais rápida e quando é necessária apenas a validação da rede através de vários arquivos.

A terceira função é a mais utilizada na prática. Ela fornece um dado (consistente através do programa já mencionado Calcula\_Vo) à rede e esta fornece uma resposta para a velocidade de saída e para o *notch* a ser aplicado. Assim, pode-se entendê-la como um exemplo de utilização da rede em tempo real (Figura 4.23). É importante ressaltar que, para isso é necessário que a rede já esteja devidamente treinada e possua um arquivo de pesos.

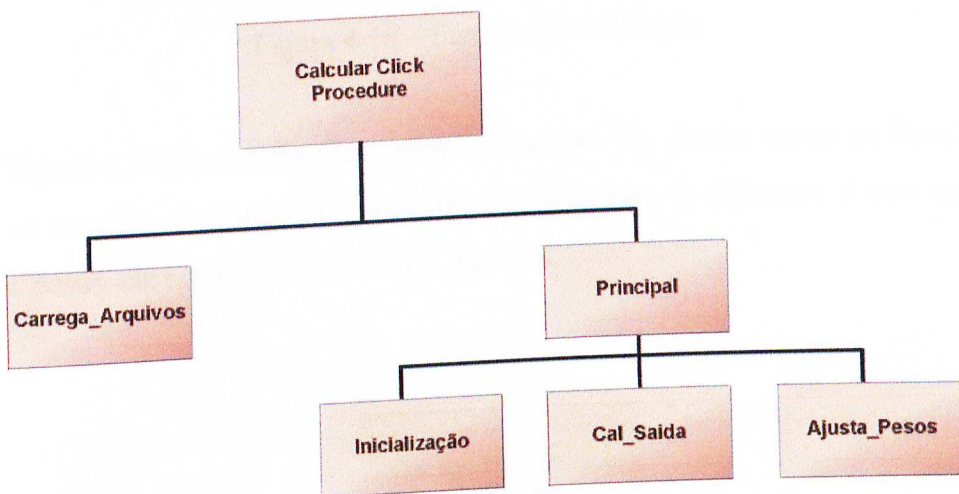


Figura 4.17– Função 01: treinamento + validação

A Figura 4.17 mostra detalhadamente a Função 01. Ao clicar no botão “Calcular”, o usuário estará disparando um procedimento no Delphi que realizará diversas funções. A primeira delas é carregar os arquivos. No caso, foram carregados dois arquivos de 10.000 dados, um para treinamento e o outro para a validação. Depois de carregados os arquivos, o procedimento principal é chamado, chamando em seguida uma inicialização, a função de cálculo das saídas e a função que atualizará os pesos. A função que calcula as saídas ainda realizará chamada a duas outras funções. Assim, esta é a função responsável pelo treinamento e validação.



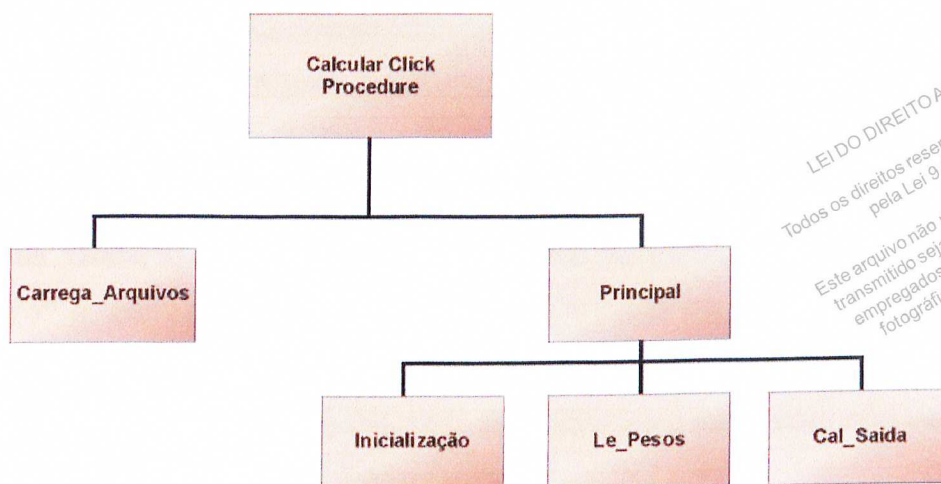


Figura 4.18 – Função 02: validação

A Figura 4.18 mostra detalhadamente a Função 02. Assim como na Função 01, ela carregará os arquivos e chamará o procedimento principal. A diferença é que, ao invés de atualizar os pesos, ela realizará a leitura dos mesmos.

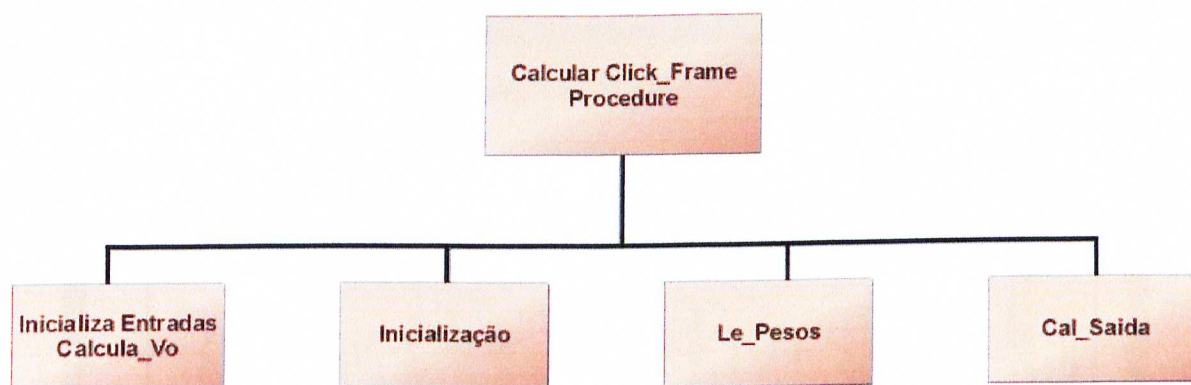


Figura 4.19 – Função 03: validação em tempo real

A Figura 4.19 mostra a Função 03. Esta utiliza um programa dentro de outro, ou seja, o “Calcula\_Vo” dentro do “Yamakawa\_Delphi”. Isso é feito através da chamada à função “InicializaEntradasCalcula\_Vo”. Após essa chamada, a rede possui o “corte” para o qual serão fornecidos a velocidade de saída e o *notch* inicial. Para isso, ela utiliza os mesmos princípios da validação da Função 02. É interessante dizer que, uma vez que o programa “Calcula\_Vo” é utilizado, a velocidade de saída e o *notch* inicial também são calculados através das tabelas antigas do sistema, juntamente com as fórmulas de Davis e as outras. Assim, é possível comparar as duas respostas e perceber o quanto a rede errou ou até mesmo “corrigiu” o cálculo realizado através do outro método.

#### 4.8 Demonstração com os Dados Simulados

A seguir, são apresentadas as figuras que demonstram o aplicativo final, utilizando rede *neurofuzzy* no *Hump Yard*.

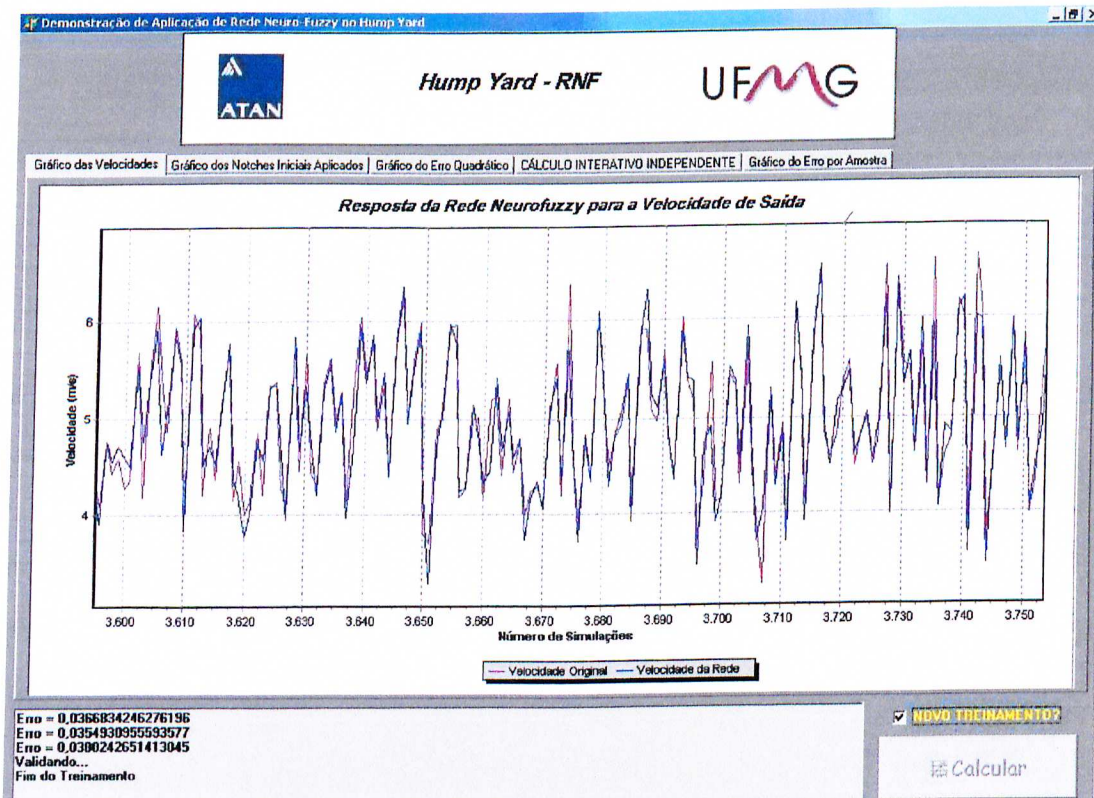


Figura 4.20 – Velocidade de saída



A primeira figura (Figura 4.20) apresenta uma comparação entre as velocidades de saída geradas, com os dados e equações originais do sistema e as calculadas pela rede neurofuzzy empregada. Assim como no MATLAB®, a RNF mostrou resultados excelentes com baixo erro, validando sua aplicação no processo prático.

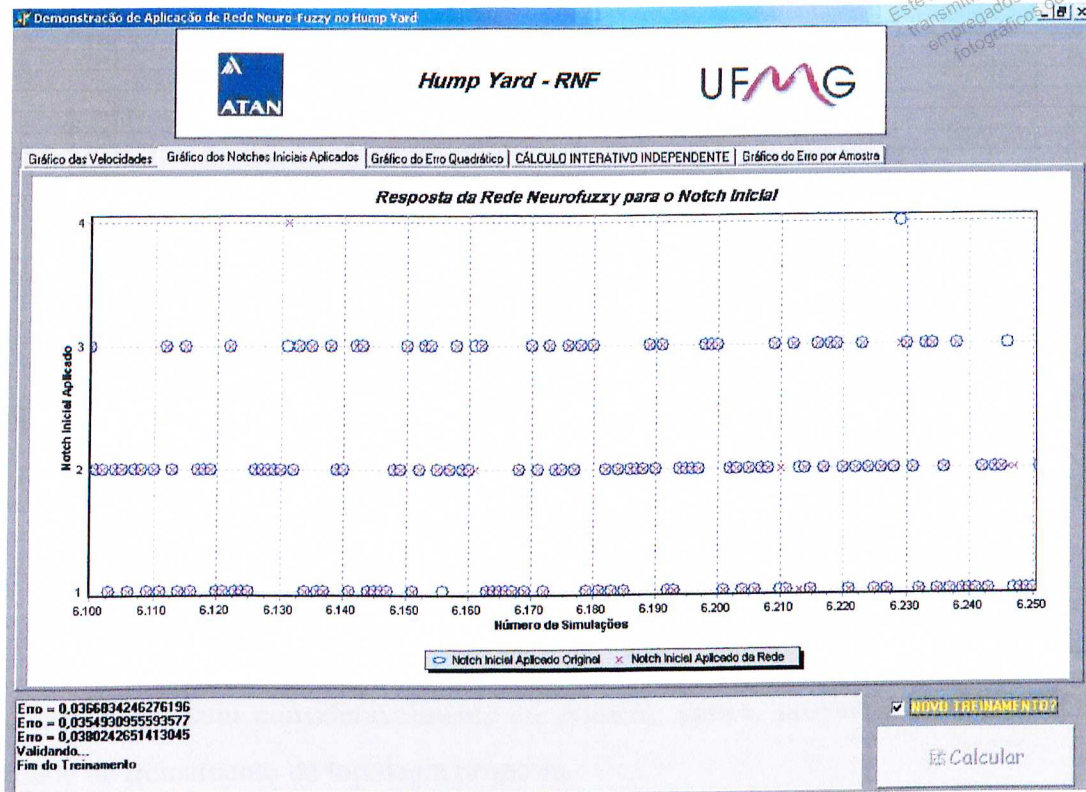


Figura 4.21 – *Notch* inicial

A segunda figura (Figura 4.21), mostra claramente que os *notches* aplicados estão sendo calculados pela rede com sucesso, apenas quatro erros em aproximadamente cem simulações.

Uma observação importante para o treinamento da saída de *notch* aplicado foi a distribuição uniforme dos dados durante a geração dos mesmos, ou seja, todos os dados foram gerados com probabilidade igual de ocorrência. Assim, a RNF pode ser treinada de forma mais genérica.

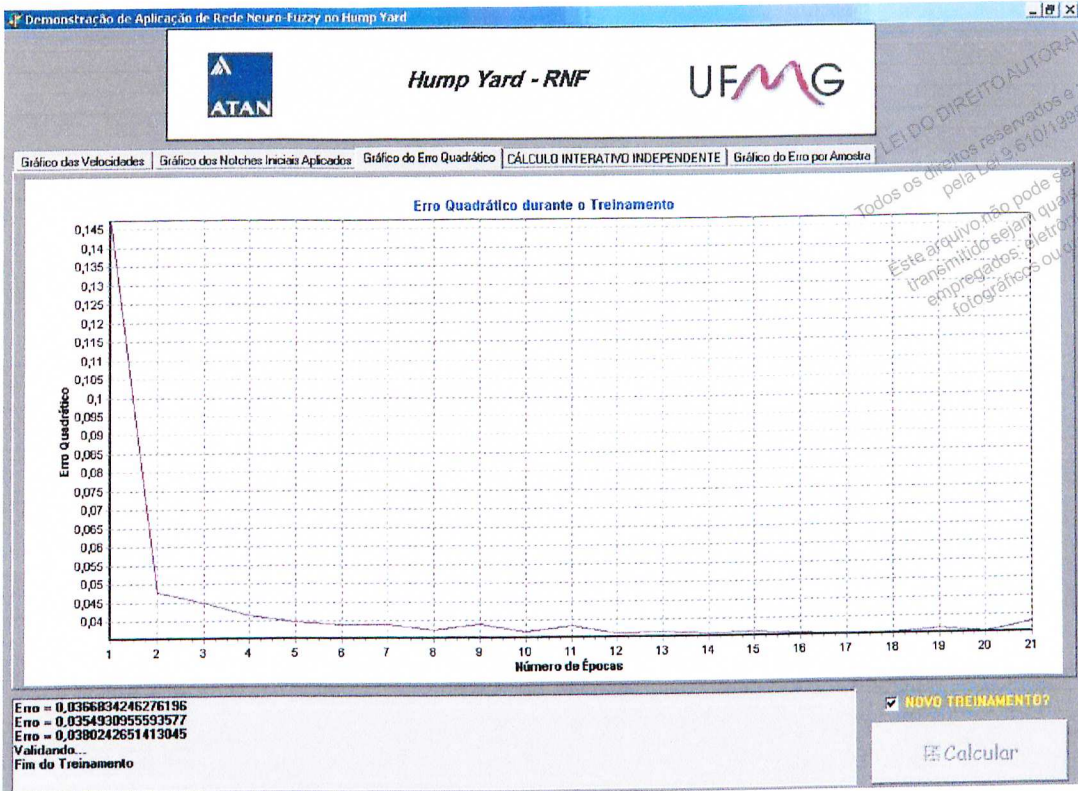


Figura 4.22 – Erro quadrático

Na Figura 4.22 a convergência ocorre logo na segunda época de treinamento, ou seja, o erro quadrático caiu consideravelmente na primeira época, provando a alta eficiência e velocidade de treinamento da topologia proposta.



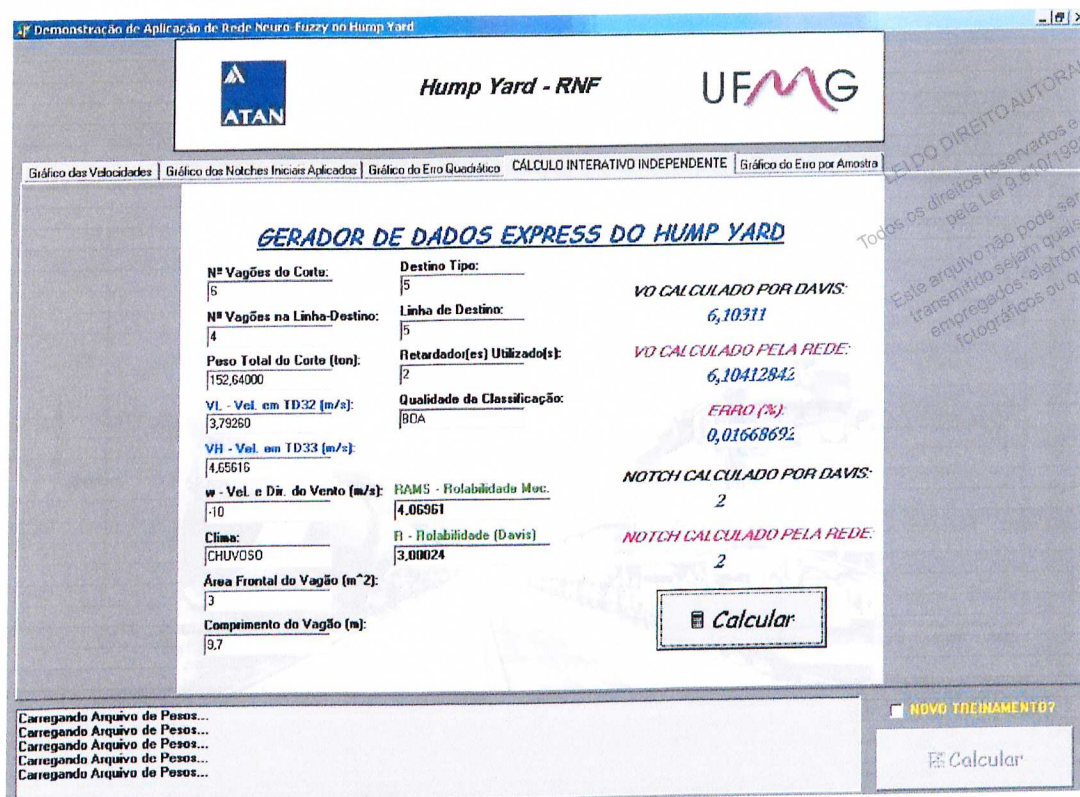


Figura 4.23 – Cálculo em tempo real

De forma simples, foi possível demonstrar, através do aplicativo da Figura 4.23, que o sistema inteligente responderia satisfatoriamente em tempo real, possibilitando sua aplicação no processo. Para essa demonstração, basta o usuário clicar no botão “Calcular” para obter a resposta da RNF (à direita) para os dados simulados (à esquerda), mostrando ainda o erro percentual do cálculo da RNF para o cálculo original da velocidade de saída.



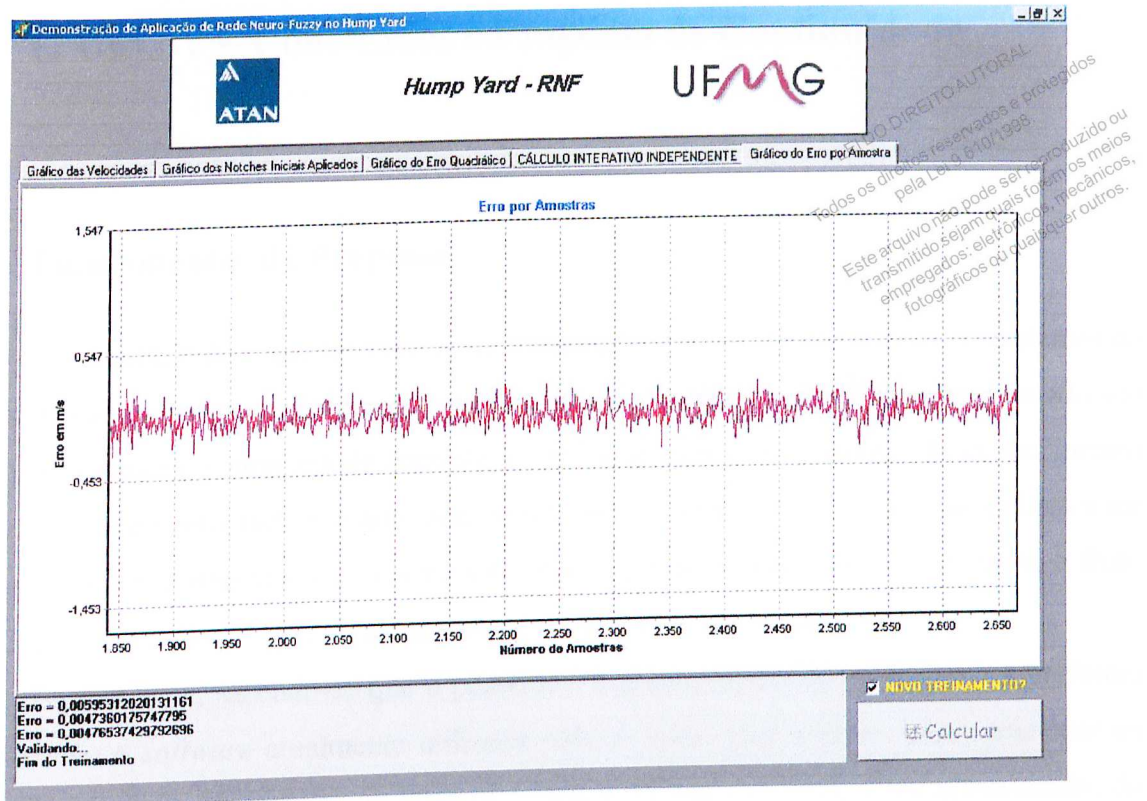


Figura 4.24 – Erro por amostra

É mostrado na Figura 4.24 o erro por amostra, que representa o erro na unidade de engenharia (m/s) para cada simulação. Estes resultados foram bastante satisfatórios, pois na grande maioria dos casos apresentaram erro inferior a 0,5m/s.

Outra análise importante feita durante os estudos e simulações mostrados é que a RNF apresentou uma capacidade de aproximação fantástica. Os cálculos baseados em tabelas e equações originais são muito grosseiros, pois dependem de um levantamento de campo bem elaborado. Dessa forma, muitas vezes, um cálculo feito pelo algoritmo original pode estar errado que, mesmo assim, a RNF apresenta resultados mais lógicos, devido ao seu poder de aproximação, filtrando as informações erradas presentes na massa de dados apresentada. Isto porque existe uma tendência lógica seguida pela RNF.

## CAPÍTULO V – Conclusões e Proposta de Continuidade

### 5.1 Fundamentos da Proposta

Até agora, tudo o que foi visto neste trabalho baseou-se em simulações consistentes do processo, com a conseqüente geração de um Banco de Dados e um aplicativo baseado em RNF para cálculo de variáveis de controle do processo através da extração de conhecimento dos dados. No entanto, tudo isto não faria sentido se não houvesse uma aplicação prática a ser proposta. Esse trabalho visa exatamente este foco e, possivelmente, dentro em breve, o fruto obtido aqui será aplicado para o refinamento do controle no processo real.

Basicamente, sabendo-se que é possível a implementação da RNF com a plataforma de *hardware* e *software* atualmente utilizada pelo sistema, sem nenhum custo adicional na compra de novos equipamentos ou licenças e, que o sistema está totalmente ultrapassado, do ponto de vista de sua engenharia, para o cálculo dos *set-points*. Vislumbra-se um “casamento” perfeito entre uma nova tecnologia e seu propósito, uma vez que as comprovações aqui apresentadas irão melhorar a qualidade da classificação de vagões, evitando colisões ou paradas prematuras.

As únicas intervenções necessárias do operador seriam, a correção do *set-point* no caso de novos cortes fora dos padrões treinados pela RNF e o *feedback* da qualidade das classificações, possibilitando um retreinamento. Estas verificações podem ser feitas visualmente e informadas ao sistema por meio do *software* supervisor, porém, num futuro próximo, o procedimento de realimentação da qualidade das classificações poderia ser instrumentado através do uso de sensores de vibração nas linhas de classificação para detecção de colisões fortes e processamento de imagem para detecção de paradas curtas.

Tudo isto, possibilita uma argumentação segura perante o usuário final, de que o sistema traria resultados positivos.

### 5.2 Estrutura do Projeto

Para a concretização do exposto no item 5.1, primeiramente será necessária a estruturação do projeto, inserindo-o no contexto do sistema atual. Isto quer dizer que todas as interfaces e soluções de comunicação devem estar preparadas para a utilização do aplicativo.



Garantindo esta afirmativa, está o fato de que o trabalho foi elaborado desde seu início com o uso das ferramentas necessárias para esta consolidação, ou seja, consultas ao Banco de Dados utilizado pelo sistema, assim como leituras e escritas no servidor OPC.

A figura a seguir (Figura 5.1) apresenta a estrutura do projeto para a aplicação desejada, mostrando o contexto no qual a RNF se enquadra.

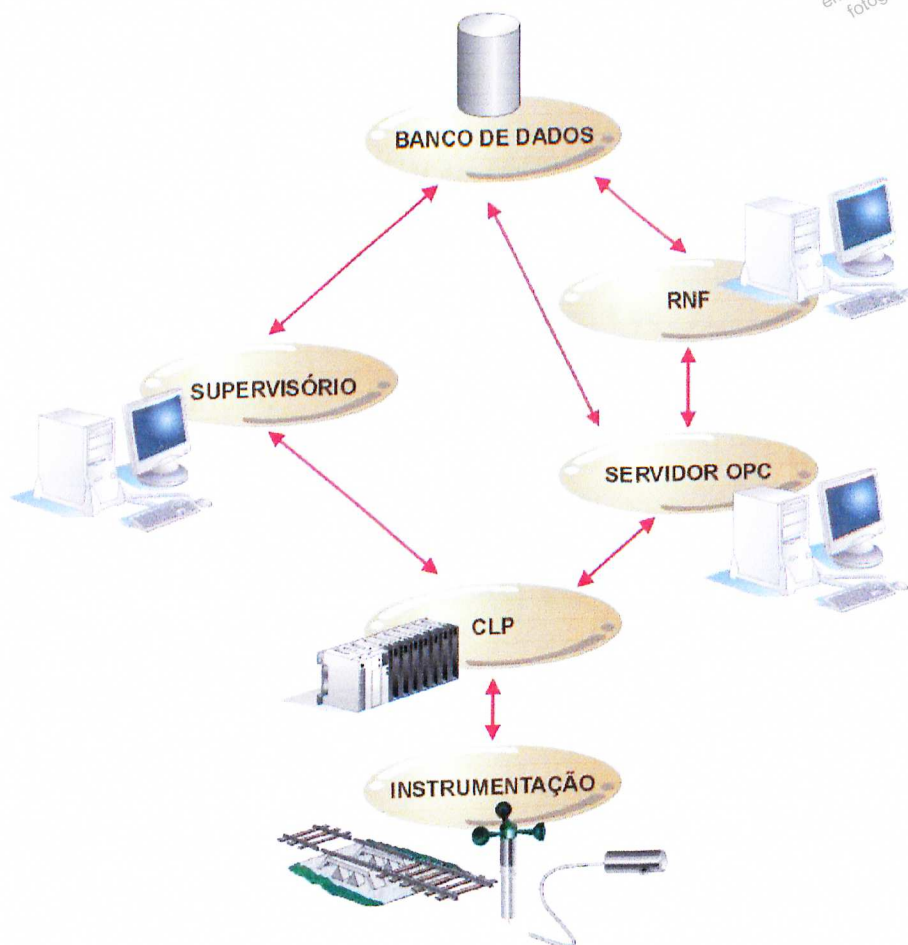


Figura 5.1 – Estrutura do projeto proposto

Para a estrutura apresentada acima, a RNF seria facilmente inserida, ficando para a implementação final toda a interface de leitura e escrita do Banco e do Servidor. O arquivo dos pesos seria gravado na máquina em que estivesse “rodando” o aplicativo da RNF e seria atualizado conforme será visto no item 5.3.

A seguir, são descritos todos os dados de leitura e escrita necessários durante a classificação, bem como suas respectivas localizações.

- DADOS DE ENTRADA PARA O APLICATIVO DA RNF (LEITURA)

- Número de vagões do corte; (BANCO DE DADOS)
- Número de vagões na linha destino; (BANCO DE DADOS)
- Destino-tipo, conforme necessidade de manutenção; (BANCO DE DADOS)
- Linha de destino; (BANCO DE DADOS)
- Peso total do corte em (ton); (SERVIDOR OPC)
- Velocidade de passagem no sensor H em (m/s); (SERVIDOR OPC)
- Velocidade de passagem no sensor L em (m/s); (SERVIDOR OPC)
- Velocidade e direção do vento em (m/s) com sinal + ou - ; (SERVIDOR OPC)
- Clima: bom ou chuvoso; (SERVIDOR OPC)
- Solicitação do cálculo de vel. ótima e *notch* inicial; (SERVIDOR OPC)

- DADOS DE SAÍDA DO APLICATIVO DA RNF (ESCRITA)

- Velocidade de saída final em (m/s); (SERVIDOR OPC)
- *Notch* inicial a ser aplicado. (SERVIDOR OPC)

### 5.3 Treinamento da Rede com os Dados Reais do Processo

Para o treinamento da rede em tempo real, tornando o sistema adaptativo a cada nova situação apresentada, é necessária a utilização da função implementada para treinamento após cada novo corte ter completado a classificação, desde que este corte tenha sido considerado bem classificado pelo operador. Isto faz com que o arquivo texto, contendo os pesos, esteja sempre sendo atualizado pelo aplicativo e lido para uma próxima classificação. A Figura 5.2 a seguir representa este treinamento da NFN, onde o  $X$  são os dados do corte, o  $y^d$  são as saídas desejadas pelo sistema e  $y$  as saídas calculadas pela NFN.



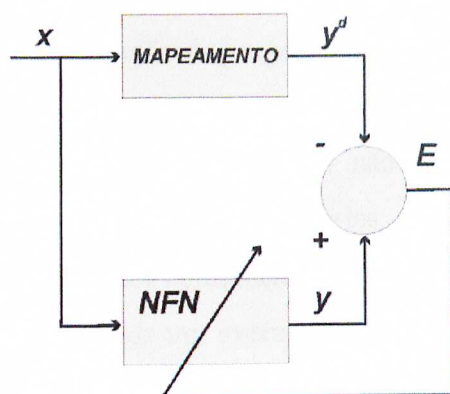


Figura 5.2 – Treinamento após classificação com sucesso

Este treinamento seria então feito em tempo real, após cada novo corte classificado com sucesso, atualizando os pesos e permitindo a utilização para uma nova classificação, conforme Figura 5.3 abaixo.

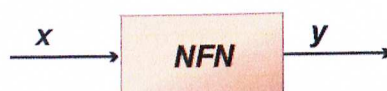


Figura 5.3 – Cálculo das saídas

## 5.4 Conclusões

Foi apresentado neste trabalho um estudo, buscando a solução para um problema prático enfrentado na indústria, utilizando-se técnicas avançadas de inteligência computacional com baixo custo computacional e simples implementação.

Tomando o projeto em questão como referência, pode-se certamente afirmar que o mesmo possui características muito interessantes se comparado a outros processos industriais. Primeiramente por ser totalmente atípico, sendo único no Brasil, em segundo lugar por permitir a aplicação de diversas e modernas técnicas de controle e programação, bem como instrumentações, possibilitando otimizações com benefícios ao cliente. Isto se deve ao fato do projeto original ter sido concebido em uma fase de poucos recursos computacionais na história da Automação Industrial e que hoje, com o constante avanço tecnológico, muda a filosofia do projeto em muitos aspectos.



Outro fato importantíssimo, que merece destaque no trabalho, é a implementação de um simulador do sistema, com a aplicação de programação *multi-threaded*. Este possibilitou a consolidação dos testes de plataforma e uma completa análise do sistema, tanto do ponto de vista de *hardware* quanto de *software*. O simulador não só testou as funcionalidades do sistema, mas também permitiu a introdução de melhorias, no momento em que previamente detalhou o processo, trazendo uma maior confiança à equipe do projeto.

Além disso, este trabalho é mais um exemplo claro da aplicação de rede *neurofuzzy*, sendo esta bastante atraente em aplicação de identificação de sistemas não lineares, por apresentar ótimo desempenho e baixa complexidade, exatamente o que o processo exige, por se tratar de um sistema com tempos de resposta muito críticos. Em pesquisas realizadas através de artigos atuais de *Hump Yard* fora do Brasil [13],[20],[21], foi constatado que possivelmente não existem casos de aplicação de rede *neurofuzzy* a este tipo de processo, sendo este trabalho inédito no cenário mundial.

Enfim, o fruto deste trabalho, se aplicado fielmente, trará uma considerável melhoria na qualidade das classificações, evitando com isso falhas no processo e amortizando os investimentos [5].

## Referências

- [1] BRAGA, Antônio de Pádua; CARVALHO, André Ponce de Leon F. de; LUDERMIR, Teresa Bernarda. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 262p.
- [2] CAMINHAS, Walmir Matos; PEREIRA, Guilherme A.S.; TAVARES, Hermano M.F.; GOMIDE, Fernando A.C. **Identificação de sistemas dinâmicos: abordagem baseada em neurônio nebuloso**. [S.l.: s.n., 199-]
- [3] DAMASCENO, Jedson Alessandro. **Especificação de equipamentos, Hump Yard**. Belo Horizonte: Atan. 2002. 11f.
- [4] DAMASCENO, Jedson Alessandro. **Especificação técnica para avaliação e tratamento de limitações funcionais do sistema, Hump Yard**. Belo Horizonte: Atan. 2003. 5f.
- [5] DAMASCENO, Jedson Alessandro. **Relatório técnico de avaliação e tratamento das limitações funcionais do sistema atual, Hump Yard**. Belo Horizonte: Atan. 2003.
- [6] ESCA. **Sistema de supervisão e controle do pátio de classificação de vagões: projeto funcional**. [S.l.: 198-] 180f.
- [7] ESCA. **Sistema de supervisão e controle do pátio de classificação de vagões: modelo matemático da dinâmica de vagões, levantamento de dados**. [S.l.]: 1986. 91f.
- [8] Heggestad, R. E. **Semiautomatic Operation for Upgrading Intermediate-Sized Hump Yards**. Transportation Research Record 927. 1983, 23-26. Disponível em: <[http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs\\_Yard\\_Ops.htm](http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs_Yard_Ops.htm)>.
- [9] Hopkins, J. B., Dorer, R. M. and McGrath, T. P. **Classification Yard Capacity and Hump Yard Simulation Model**. Transportation Systems Center, Cambridge, MA. 1980. Disponível em: <[http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs\\_Yard\\_Ops.htm](http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs_Yard_Ops.htm)>.

- [10] International Union of Railways. **Continuous Measurement and Control of the Speed of Wagons Shunted Over Humps. The Potential Capacity of Various Types of Automatic Humping System. (Part I).** International Union of Railways, Utrecht, Netherlands. 1967. Disponível em: [http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs\\_Yard\\_Ops.htm](http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs_Yard_Ops.htm).
- [11] International Union of Railways. **Continuous Measurement and Control of the Speed of Wagons Shunted Over Humps. The Potential Capacity of Various Types of Automatic Humping System. (Part II),** International Union of Railways, Utrecht, Netherlands. 1969. Disponível em: [http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs\\_Yard\\_Ops.htm](http://hometown.aol.com/chipkraft/Refs_Yard_Ops.htm).
- [12] JANG, Jyh-Shing Roger; SUN, Chuen-Tsai; MIZUTANI, Eiji. **Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence.** Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. 614p.
- [13] KUBE, Kathi. **Getting over the hump.** Progressive Railroading, p.50-52, July. 2002.
- [14] MARQUES, Wagner Francisco; DAMASCENO, Jedson Alessandro. **Manual do aplicativo de controle, Hump Yard.** Belo Horizonte: Atan.2003. 170f.
- [15] NICÁCIO, Lucas Gomes Dutra. **Desenvolvimento de Aplicativos para a Simulação e Modelagem de um Pátio de Classificação de Vagões - Hump Yard.** Monografia de Final de Curso. Belo Horizonte. UFMG. 2004.
- [16] SEIXAS FILHO, Constantino; SZUSTER, Marcelo. **Programação concorrente em ambiente Windows: uma visão de automação.** Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2003. 364p.
- [17] SHABELNIKOV, Alexandr N. **The intellectual model of control over loose couplings' rolling down process based on an indistinct dynamic system.** In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS (ICAIS' 02). Divnomorskoe. Proc. Of the Washington: IEEE Computer Society, 2002.
- [18] SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy. **Controle e modelagem fuzzy.** São Paulo: Edgard Blücher; FAPESP, 1999. 165p.

- [19] STARLING, Ronan Antonio da Silveira. **Sistema de supervisão e controle Hump Yard: especificação funcional**. Belo Horizonte: Atan, 2002. 116f.
- [20] THE RAILROAD NETWORK, New York: Technical Services of New York, 2003. Disponível em: <<http://www.railroad.net>>.
- [21] TRAINS MAGAZINE, Chicago: Chicago Tribune, 2003. Disponível em: <<http://www.trains.com/Content/Dynamic/Articles>>.
- [22] YAMAKAWA, T.; UCHINO, E.; MIKI, T.; KUSANAGI. **A neo fuzzy neuron and its applications to system identification and predictions to system behavior**. Proc. Of the 2<sup>nd</sup> IIZUKA, Iizuka-Japan, pp. 477-483.



LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

## **Apêndice(s)**

## Apêndice A - Modelo Matemático da Dinâmica de Vagões<sup>4</sup>

### A.1 – Dinâmica do Movimento

Antes de descrever o equacionamento matemático do movimento dos vagões do sistema é necessário efetuar um equacionamento das principais forças existentes no movimento e descrever as forças resistentes ao movimento.

#### A.1.1 – Equacionamento de Forças

Seja um vagão em uma trajetória não retilínea conforme a Figura A.1.

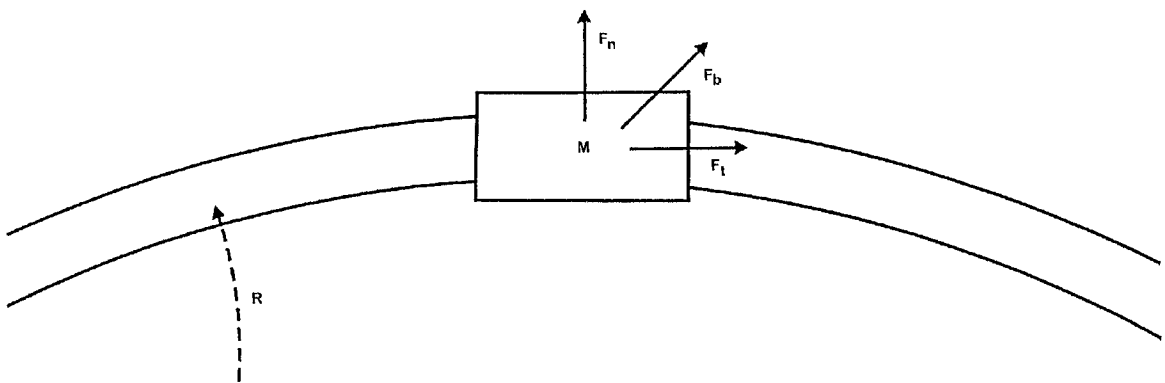


Figura A.1 – Trajetória não retilínea de um vagão

As forças que atuam no sistema são:

- $F_t \rightarrow$  força resultante tangencial ao movimento do vagão, que pode ser descrito pela lei de Newton por:

$$m \frac{dv}{dt} = F_t(v, s)$$

- $F_n \rightarrow$  força resultante perpendicular ao movimento que pode ser descrito como:

$$\frac{mv^2}{R} = F_n(v, \lambda)$$

<sup>4</sup> As informações contidas neste apêndice foram obtidas de: ESCA. Sistema de supervisão e controle do pátio de classificação de vagões: modelo matemático da dinâmica de vagões, levantamento de dados. [S.l.]: 1986. 91f.

- $F_b \rightarrow$  força resultante do peso de reação do trilho, que pode ser descrito pela lei de Newton por:

$$F_b(v, s) = 0$$

Aplicando-se as equações para o caso de trajetória do vagão em linha reta sob um plano inclinado tem-se:

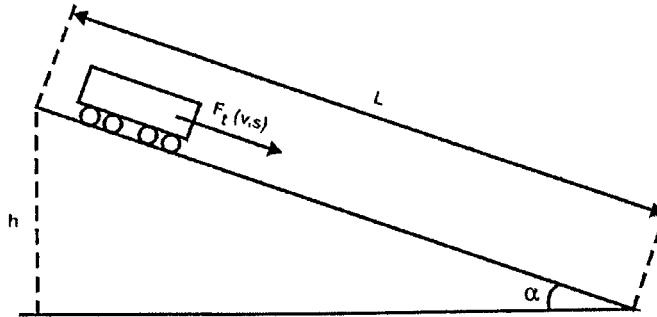


Figura A.2 – Vagão em um plano inclinado

$$F_t(v, s) = m \frac{dv}{dt}$$

$$F_n(v, s) = 0$$

$$F_b(v, s) = 0$$

A força resultante tangencial pode ser descrita conforme a Figura A.3 como:

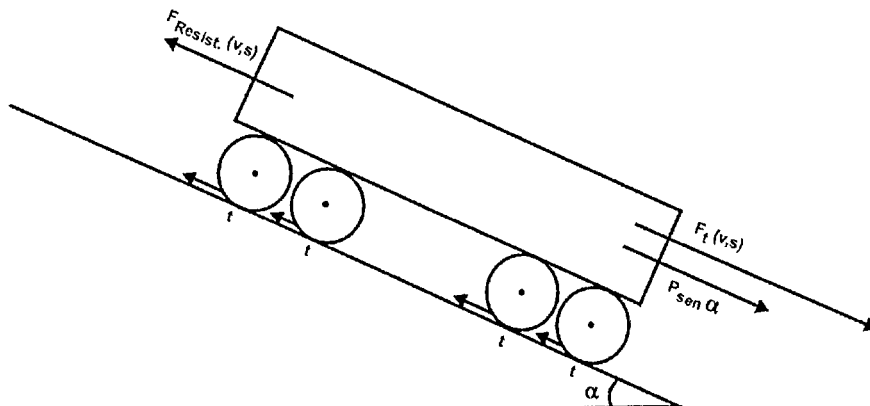


Figura A.3 – Forças que atuam no vagão

$$F_t(v, s) = P \operatorname{sen} \alpha - 2Nf - F_{\text{resist}}(v, s)$$

Onde:

- $m \frac{dv}{dt} = F_t(v, s)$ ;
- $\operatorname{sen} \alpha = \frac{h}{L} = \theta$ ;
- $2Nf$  = força de atrito estático entre as rodas e os trilhos;
- $F_{\text{resist}}(v, s)$  = força resultante da resistência ao movimento devido a outras causas (ver item A.1.2).

Tem-se:

$$m \frac{dv}{dt} = P\theta - 2Nf - F_{\text{resist}}(v, s) \quad (\text{A.1})$$

Onde:

- $m$  = massa do vagão;
- $P$  = peso do vagão;
- $f$  = força de atrito estático que atua nas rodas, que causa o movimento das rodas;
- $N$  = número de eixos do vagão;
- $\theta$  = grade da rampa;
- $v$  = velocidade do vagão;
- $s$  = espaço.

O movimento de rotação das rodas/eixo pode ser dimensionado pelo torque exercido na roda:

$$\tau = I\beta = I \frac{d\delta}{dt}$$

Onde:

- $\tau$  = torque;
- $I$  = momento de inércia das partes girantes (roda e eixo);
- $\beta$  = aceleração angular da roda;
- $\delta$  = velocidade angular.



A força que causa a rotação das duas rodas e do eixo é devido à força de atrito estático aplicada em ambas as rodas. Assim vale a equação:

$$2f = \frac{\tau}{R} = \frac{I}{R} \cdot \frac{d\delta}{dt}, \text{ onde } R \text{ é o raio da roda.}$$

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Substituindo-se “ $f$ ” na Equação A.1 tem-se:

$$m \frac{dv}{dt} = P\theta - 2N \frac{I}{2R} \cdot \frac{d\delta}{dt} - F_{resist}(v, s)$$

Sabendo-se que:

$$- P = mg;$$

$$- \delta = \frac{v}{R}.$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg\theta - \frac{NI}{R^2} \cdot \frac{dv}{dt} - F_{resist}(v, s)$$

Rearranjando:

$$m \frac{dv}{dt} + \frac{NI}{R^2} \cdot \frac{dv}{dt} = mg\theta - F_{resist}(v, s)$$

$$m \frac{dv}{dt} \left( 1 + \frac{NI}{mR^2} \right) = mg\theta - F_{resist}(v, s)$$

O momento de inércia de um cilindro é dado por:

$$I = \frac{M_{cilindro} \cdot R^2}{2}$$

Como o conjunto 2 rodas e eixo não possui a massa distribuída conforme um cilindro, considera-se o momento de inércia do conjunto como:

$$I = x \cdot \frac{M_{girante} \cdot R^2}{2}$$

Onde:

- $M_{girante}$  = massa de 2 rodas mais o eixo;
- $R$  = raio da roda;
- $x$  = fator de ajuste do momento de inércia de cilindro ao conjunto 2 rodas e o eixo do vagão, é o fator que depende da forma do conjunto rodas e eixo.

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 por Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Substituindo-se na equação tem-se:

$$m \frac{dv}{dt} \left( 1 + x \cdot \frac{N \cdot M_{girante} \cdot R^2}{m \cdot 2 \cdot R^2} \right) = mg\theta - F_{resist}(v, s)$$

$$m \frac{dv}{dt} \left( 1 + x \cdot \frac{N}{m} \cdot \frac{M_{girante}}{2} \right) = mg\theta - F_{resist}(v, s)$$

Sendo:

$$\frac{M_{girante}}{m} = \frac{P_{girante}}{P}$$

Onde:

- $P_{girante}$  = peso do conjunto 2 rodas mais o eixo;
- $P$  = peso total do vagão.

$$m \frac{dv}{dt} \left( 1 + x \cdot \frac{N}{P} \cdot \frac{P_{girante}}{2} \right) = mg\theta - F_{resist}(v, s)$$

Dividindo ambos os lados por P e substituindo:  $\frac{m}{P} = \frac{1}{g}$

$$\frac{m}{P} \cdot \frac{dv}{dt} \left( 1 + \frac{x \cdot N \cdot P_{girante}}{2P} \right) = \theta - \frac{F_{resist}(v, s)}{P}$$

$$\frac{dv}{dt} \left( 1 + \frac{x \cdot N \cdot P_{girante}}{2P} \right) = \theta - \frac{F_{resist}(v,s)}{P}$$

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Definindo:

$$\frac{F_{resist}(v,s)}{P} = R(v,s) \rightarrow \text{Rolabilidade};$$

$$1 + \frac{x \cdot N \cdot P_{girante}}{2P} = 1 + \rho \rightarrow \text{onde } \rho \text{ é o coeficiente devido às partes girantes.}$$

Tem-se:

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1 + \rho}{g} = \theta - R(v,s) \quad (\text{A.2})$$

Revisando tem-se:

- $\theta$  = grade da rampa;
- $R$  = rolabilidade do vagão;
- $g$  = aceleração da gravidade;
- $1 + \rho = 1 + \frac{x \cdot N \cdot P_{girante}}{2P}$ ;
- $x$  = fator de ajuste do momento de inércia devido a forma das 2 rodas e o eixo;
- $N$  = número de eixos;
- $P$  = peso da roda;
- $P_{girante}$  = peso das 2 rodas mais o eixo;
- $v$  = velocidade do vagão.

Sabe-se que o peso de 2 rodas mais o seu eixo estão na faixa de 860 a 1200 kg e que 60% dos vagões possui o conjunto pesando 1100 kg, nesta situação:

Se considerarmos que “ $x$ ” é aproximadamente igual a 1 tem-se que:

$$1 + \rho = 1 + 0,55 \frac{N}{P}$$

A Equação A.2 descreve o movimento do vagão considerando que a influência do material rodante está embutido no termo  $1 + \rho$ . Além disso, pode-se considerar que, devido ao material rodante, a aceleração da gravidade efetiva é dada por  $\frac{g}{1 + \rho}$  e considerando que o movimento é de apenas translação sem as partes rodantes.

Um outro método de considerar a parte rodante no equacionamento do movimento é definindo o conceito de massa de inércia ( $m'$ ) por:

$$m' = m \cdot (1 + \rho), \text{ onde } m = \text{massa do vagão.}$$

No equacionamento tem-se:

$$m' \frac{dv}{dt} = mg\theta - F_{resist}$$

O resultado é análogo ao obtido.



### A.1.2 – Forças de Resistência ao Movimento

Foi considerada até este momento a existência da força de resistência resultante sem especificar as principais forças que o compõem.

Com a finalidade ilustrativa serão descritas estas forças, sem a preocupação de efetuar a dedução das equações que as descrevem.

As principais forças resistentes são:

- Força de resistência devido à fricção no eixo;
- Força de resistência devido à perda de energia em função da deformação do trilho;
- Força de resistência devido à perda de energia em função da compressão da rota;
- Força de resistência devido às curvas;
- Força de resistência do ar.

#### a ) Força de resistência devido à fricção no eixo ( $F_f$ )

É a resistência devido ao contato com as partes girantes: dependente das características de rolamento do vagão.

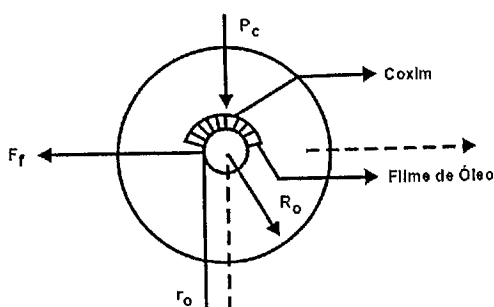


Figura A.4 – Força de resistência devido à fricção no eixo

$P_C$  = peso no coxim;

$\mu_C$  = coeficiente de fricção;

$R_O$  = raio da roda;

$r_o$  = raio do eixo.

$$F_f = \frac{P_c \mu_c \cdot r_o 10^3 (Kgf)}{R_o}$$

b) Força de resistência devido à perda de energia em função da deformação do trilho ( $F_{C'}$ )

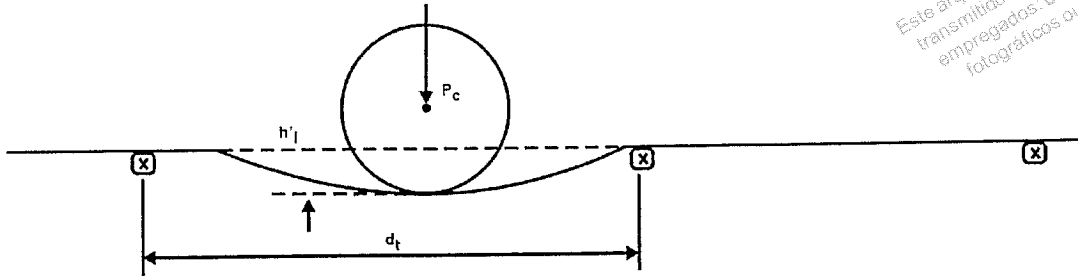


Figura A.5 – Força de resistência em função da deformação no trilho

c) Força de resistência devido à perda de energia em função da compressão da roda ( $F_{C'}$ )

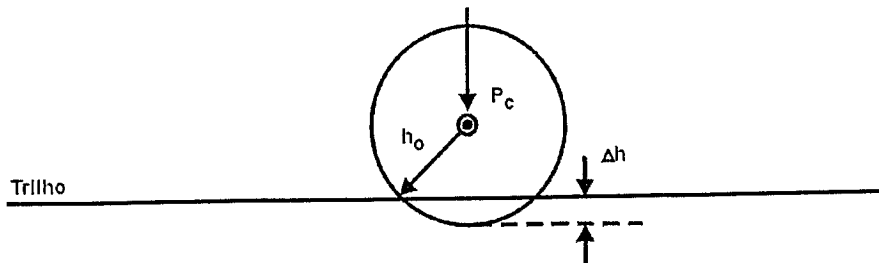


Figura A.6 - Força de resistência em função da compressão da roda

d) Força de resistência devido às curvas e zona de chaves ( $F_{C'P}$ )

Esta força é causada pela dependência das rodas aos eixos que sob pequenas curvaturas causam um deslizamento da roda sob o trilho, apesar das características da rota e da folga existente entre a via e o eixo.

Além disso, devido ao movimento curvilíneo, existe a força centrífuga ao movimento.

e) Força de resistência do ar ( $F_a$ )

Esta força depende:

- da forma e natureza das superfícies do veículo;
- da velocidade relativa do vagão à velocidade do vento;
- do ângulo de incidência do ar sob o vagão.

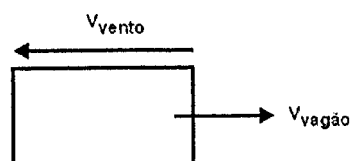


Figura A.7 - Força de resistência do ar

Considerando apenas a influência do vento na direção do movimento, e sendo  $V_{vento}$  a componente da velocidade do vento nesta direção, tem-se que:

$$F_a = K \cdot F \cdot \frac{\delta}{2g} \cdot V_{rel}^2$$

porém,  $V_{rel} = w + v$  e se consideramos  $V_{rel}^2$  como  $(w + v) \cdot |w + v|$ ,

onde:  $w$  = velocidade do vento.

$$F_a = K \cdot F \cdot \frac{\delta}{2g} \cdot (w + v) \cdot |w + v|$$

Observa-se que  $w$  é positivo se for contrário ao movimento, sendo que  $F_a$  será positivo ou negativo conforme o valor da expressão, o que não ocorria quando era expresso em termos de  $V_{rel}^2$ .

Descrevendo tem-se:

$k$  = coeficiente que depende da forma do vagão;

$F$  = secção do vagão sob a influência do vento ( $m^2$ );

$\delta$  = densidade do ar ( $1,25 \text{ Kgf/m}^3$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ );

$w$  = velocidade do vento ( $m/s$ );

$v$  = velocidade do vagão ( $m/s$ ).

Cabe observar que se considerarmos  $k = 1$  tem-se que:

$$K = \frac{k \cdot \delta}{2 \cdot g} = \frac{1 \cdot 1,25}{2 \cdot 9,8} = 0,06 \text{Kgf} / \text{s}^2 / \text{m}^4$$

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Podendo-se escrever como:

$$F_a = K \cdot F \cdot (w + v) \cdot |w + v| \quad (\text{A.3})$$

### A.1.3 – Rolabilidade

No item de equacionamento das forças foi definida a rolabilidade como:

$$R = \frac{F_{resist(v,s)}}{p} \quad (p = \text{peso do vagão})$$

E a força de resistência resultante pode ser escrita como:

$$F_{resist} = F_f + F_c + F_{c'} + F_{c'p} + F_a$$

Onde:

$F_f$  = força de resistência devido à fricção no eixo;

$F_c$  = força de resistência devido à compressão da roda;

$F_{c'}$  = força de resistência devido à deformação do trilho;

$F_{c'p}$  = força de resistência às curvas e zonas de chaves;

$F_a$  = força de resistência do ar.

Tem-se que:

$$R = R_f + R_c + R_{c'} + R_{cp} + R_a$$



Onde:

$$R_f + R_c + R_{c'} = R_m;$$

$R_m$  = resistência mecânica;

$R_{cp}$  = resistência à curva e zona de chave;

$R_a$  = resistência do ar.

Assim:

$$R = R_m + R_{c'p} + R_a \quad (\text{A.4})$$

e

$$R_a = \frac{F_a}{P} = \frac{KF}{p} \cdot (w + v) |w + v| \quad (\text{A.5})$$

### A.1.3.1 – Fórmula de Davis

A fórmula de Davis descreve a rolabilidade como:

$$R = A + BV + CV^2 \quad \text{onde } A, B \text{ e } C \text{ são coeficientes} \quad (\text{A.6})$$

Pode-se interpretar os termos da equação de Davis para o caso onde a força de resistência às curvas e zonas de chave é desconsiderada por não ser possível equacioná-la. Então partindo da equação:

$$R = R_f + R_c + R_{c'} + R_a$$

Ao verificarmos quais termos são função da velocidade tem-se que:

- Termo  $A$  → a resistência principal que contribui para este termo é a resistência à fricção entre o eixo e a roda ( $R_f$ ), que depende de cada vagão;
- Termo  $BV$  → é devido às oscilações e aos choques causados pela compressão da roda e deformação do trilho ( $R_c + R_{c'}$ );
- Termo  $CV^2$  → é o termo correspondente à resistência do ar, que depende do quadrado da velocidade do vagão para a situação onde a velocidade do vento é conhecida.

### A.1.3.2 – Rolabilidade – Rampa Efetiva

Se considerarmos um movimento do vagão na rampa sem atrito (forças de resistência resultante = 0) temos que a partir da Equação A.2:

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1 + \rho}{g} = \theta - R(v, s)$$

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1 + \rho}{g} = \theta$$

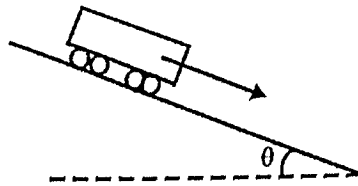


Figura A.8 – Rolabilidade – Rampa Efetiva

Esta é a equação que descreve o movimento de vagões em situação sem Forças Resistentes considerando as partes girantes ( $1 + \rho$ ).

Se considerarmos o sistema com atrito e descrevendo o movimento na forma geral.

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1 + \rho}{g} = \theta - R$$

A analogia deste movimento com o movimento na situação sem atrito é que pode-se considerar o movimento com atrito como sem atrito, porém sob uma inclinação  $\theta - R$ .

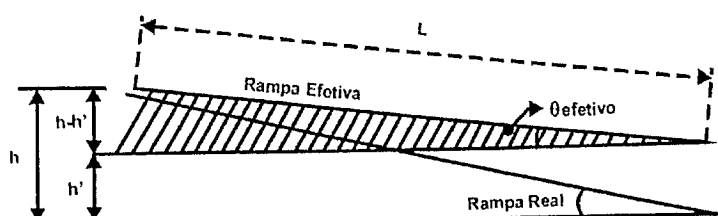


Figura A.9 – Analogia do movimento

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1+\rho}{g} = \theta_{\text{efetivo}}$$

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1+\rho}{g} = \frac{h-h'}{L} = \theta - R$$

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Considerando que R é função da velocidade do vagão a analogia pode ser refinada para:

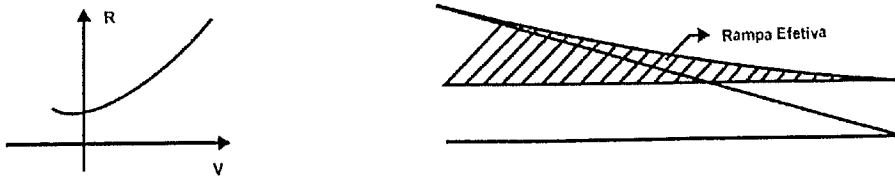


Figura A.10 – Analogia refinada

## A.2 – Conservação de Energia

Através do método de balanço de energia será efetuado o estudo do movimento do vagão ao longo da rampa a fim de:

- verificar a influência do material rodante;
- obter uma expressão da velocidade inicial do vagão em função do espaço percorrido e a velocidade final desejada.

Consideremos o movimento do vagão que desce uma rampa com velocidade inicial  $V_0$  e atinge o ponto final da rampa de distância S com velocidade final  $V_s$ .

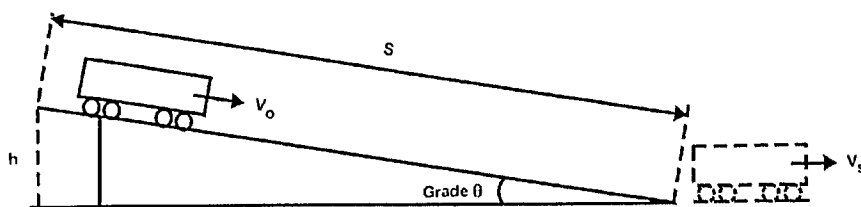


Figura A.11 – Conservação de energia

Escrevendo a equação de energia

$$\frac{1}{2}mV_o^2 + N\left(\frac{1}{2} \cdot I \cdot \gamma^2\right) + mgh = \frac{1}{2}mV_s^2 + N\left(\frac{1}{2} \cdot I \cdot \gamma^2\right) + Ep$$

Onde:

$\frac{1}{2}mV_o^2$  e  $\left(\frac{1}{2}mV_s^2\right)$ : energia cinética inicial (final) de translação;

$2N\frac{1}{2} \cdot I \cdot \gamma^2$  e  $\left(2\frac{N \cdot 1}{2} \cdot I \cdot \gamma^2\right)$ : energia cinética inicial (final) de rotação dos N eixos e as suas rodas.

- $N = n^{\circ}$  de eixos;
- $I =$  momento de inércia de 2 rodas e o seu eixo;
- $\gamma =$  velocidade angular (V/R).
- $mgh =$  energia potencial;
- $Ep =$  energia perdida devido às forças de resistência.

Tem-se que o momento de inércia pode ser expresso na forma:

$$I = x \cdot \frac{M_{girante} \cdot R^2}{2}$$

Onde:

- $x =$  fator de ajuste do momento de inércia de um cilindro  $\left(\frac{M \cdot R^2}{2}\right)$  ao conjunto 2 rodas e seu eixo;
- $R =$  raio da roda;
- $M_{girante} =$  massa do conjunto 2 rodas e seu eixo.



Substituindo tem-se que:

$$\frac{1}{2}mV_o^2 + N\left(\frac{1}{2} \cdot x \cdot \frac{M_{girante} \cdot R^2}{2} \cdot \frac{V_o^2}{R^2}\right) + mgh = \frac{1}{2}mV_s^2 + N\left(\frac{1}{2} \cdot x \cdot \frac{M_{girante} \cdot R^2}{2} \cdot \frac{V_s^2}{R^2}\right) + Ep$$

$$\frac{1}{2}mV_o^2 + \frac{1}{2} \cdot N \cdot x \cdot \frac{M_{girante} \cdot V_o^2}{2} + mgh = \frac{1}{2}mV_s^2 + \frac{1}{2} \cdot N \cdot x \cdot \frac{M_{girante} \cdot V_s^2}{2} + Ep$$

$$\frac{1}{2}mV_o^2 \left(1 + \frac{x \cdot N \cdot M_{girante}}{2m}\right) + mgh = \frac{1}{2}mV_s^2 \left(1 + \frac{x \cdot N \cdot M_{girante}}{2m}\right) + Ep$$

Tem-se:

$$1 + \frac{x \cdot N \cdot M_{girante}}{2m} = 1 + \frac{x \cdot N \cdot P_{girante}}{2P} = 1 + \rho$$

Onde:

- $P_{roda}$  = peso do conjunto 2 rodas mais o eixo;
- $P$  = peso total.

Observando-se que  $1 + \rho$  é o termo definido na descrição da dinâmica do movimento.

Substituindo  $(1 + \rho)$  na equação tem-se:

$$\frac{1}{2}mV_o^2(1 + \rho) + mgh = \frac{1}{2}mV_s^2(1 + \rho) + Ep$$

Ou seja:

$$\frac{1}{2}m(1 + \rho)[V_o^2 - V_s^2] = -mgh + Ep$$

Dividindo por  $P=mg$  e sabendo que  $h=\theta S$ :

$$(1 + \rho) \frac{V_o^2 - V_s^2}{2g} = -\theta \cdot S + \frac{Ep}{P}$$

Se a energia perdida  $E_p$  devido ao trabalho executado pelas Forças de Resistência ( $F_{resist}$ ) puder ser escrito na forma:

$$E_p = S \cdot \overline{F_{resist}}$$

Onde:

$\overline{F_{resist}}$  é a força média de resistência ao movimento.

$$(1 + \rho) \frac{V_o^2 - V_s^2}{2g} = -\theta \cdot S + \frac{S \cdot \overline{F_{resist}}}{P}$$

O valor  $\frac{\overline{F_{resist}}}{P}$  é a roabilidade média no percurso efetuado ( $\overline{R}$ ).

$$(1 + \rho) \frac{V_o^2 - V_s^2}{2g} = -\theta \cdot S + S \cdot \overline{R}$$

Se considerarmos o movimento retilíneo (sem zona de chaves e curvas).

$$\overline{R} = \overline{R_m} + \overline{R_a}$$

- $R_a$ : resistência ao ar;
- $R_m$ : resistência mecânica.

E que a aceleração da gravidade efetiva é:

$$g' = \frac{g}{1 + \rho}$$

$$\frac{1}{2}(V_o^2 - V_s^2) = -g' \cdot S\theta + g' \cdot S \cdot (\overline{R_m} + \overline{R_a})$$

Multiplicando-se por  $-1$  ambos os lados:

$$\frac{1}{2}(V_s^2 - V_o^2) = g' \cdot S \cdot (\theta - \overline{R}_m - \overline{R}_a) \quad (\text{A.7})$$

Posteriormente a mesma Equação A.7 será obtida partindo-se de  $\frac{(1+\rho)}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = \theta - R$ , porém as considerações aqui efetuadas supondo a rolabilidade no percurso como  $\overline{R}_m$  serão detalhadas a fim de verificar que esta consideração é válida.

### A.3 – Equacionamento do Movimento dos Vagões do Sistema

O sistema atual utiliza as Equações A.2, A.4 e A.5 para obter a equação geral integrada que permita:

- calcular a rolabilidade a partir dos dados coletados no campo;
- calcular a velocidade inicial do corte para atingir o ponto de engate com velocidade de engate especificada.

Escrevendo as equações:

$$\frac{1+\rho}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = \theta - R \quad (\text{A.2})$$

Onde:

- $\rho = \frac{x \cdot P_{girante} \cdot N}{2P} = 0,55 \cdot \frac{N}{P}$
- $N$  = número de eixos do corte;
- $P$  = peso total do corte (ton);
- $v$  = velocidade do corte;
- $R$  = rolabilidade;
- $\theta$  = gradiente da rampa.

$$R = R_m + R_{c,p} + R_w \quad (\text{A.4})$$

Onde:

- $R_m$ : resistência mecânica ao movimento;
- $R_{c,p}$ : resistência devido a curvas e zona de chaves;
- $R_w$  ou  $R_a$ : resistência do ar (a fim de manter a compatibilidade dos nomes das variáveis, a resistência do ar será denominada  $R_w$ ).

$$R_w = R_a = \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w+v) \cdot |w+v| \quad (\text{A.5})$$

Onde:

- $R_w$  ou  $R_a$ : resistência do ar;
- $K$ :  $0,06 \text{ kgf s}^2/\text{m}^4$ ;
- $f$ : área sob influência do vento ( $\text{m}^2$ );
- $P$ : peso total do corte;
- $w$ : velocidade do vento na direção do movimento, sendo positivo se for contrário ao movimento (m/s);
- $v$ : velocidade do corte (m/s).

Substituindo  $R$  na Equação A.2:

$$\frac{dv}{dt} = g' \cdot (\theta - (R_m + R_{c,p} + R_w))$$

Onde:

$$g' = \frac{g}{1 + \rho}$$

Substituindo  $R_w$ :

$$\frac{dv}{dt} = g' \cdot (\theta - (R_m + R_{c,p} + \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w + v) \cdot |w + v|))$$

LEI DO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Multiplicando-se a equação por  $dx$ :

$$\frac{dv}{dt} dx = g' \cdot \left[ \theta - (R_m + R_{c,p}) - \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w + v) \cdot |w + v| \right] \cdot dx$$

$$v \cdot dv = g' \cdot \left[ \theta - (R_m + R_{c,p}) - \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w + v) \cdot |w + v| \right] \cdot dx$$

Integrando-se de  $x=0$  ( $v=V_0$ ) e  $x=s$  ( $v=V_s$ ) tem-se:

$$\frac{1}{2} [V_s^2 - V_0^2] = g' \int_0^s \left[ \theta - (R_m + R_{c,p}) - \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w + v) \cdot |w + v| \right] \cdot dx$$

$$\frac{1}{2} [V_s^2 - V_0^2] = g' \cdot S \cdot \theta - g' \int_0^s (R_m + R_{c,p}) \cdot dx - g' \int_0^s \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w + v) \cdot |w + v| \cdot dx$$

Supondo que o espaço  $S$  da integração seja de linha reta (depois da zona de chaves e curva) conforme a Figura A.12.

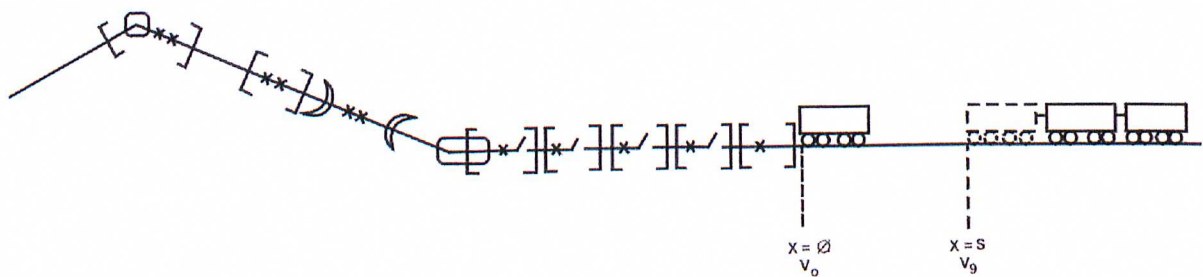


Figura A.12 – Espaço da Integração

Nas condições acima pode-se desprezar o atrito na zona de chave e curva ( $R_{c,p}=0$ ).



A equação fica:

$$\frac{1}{2} [V_s^2 - V_o^2] = g' \cdot S \cdot \theta - g' \int_0^s R_m \cdot dx - g' \int_0^s \frac{K \cdot f}{P} \cdot (w + v) \cdot |w + v| \cdot dx$$

Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.

Para resolver as integrações, considera-se que o erro é insignificante no conceito que  $dx/dt$  é aproximadamente a  $S / (V_s - V_o)$  e que é constante no movimento dos vagões para gradiente menor que 1%. Isto pode ser comprovado por medidas efetuadas conforme a Figura A.13.

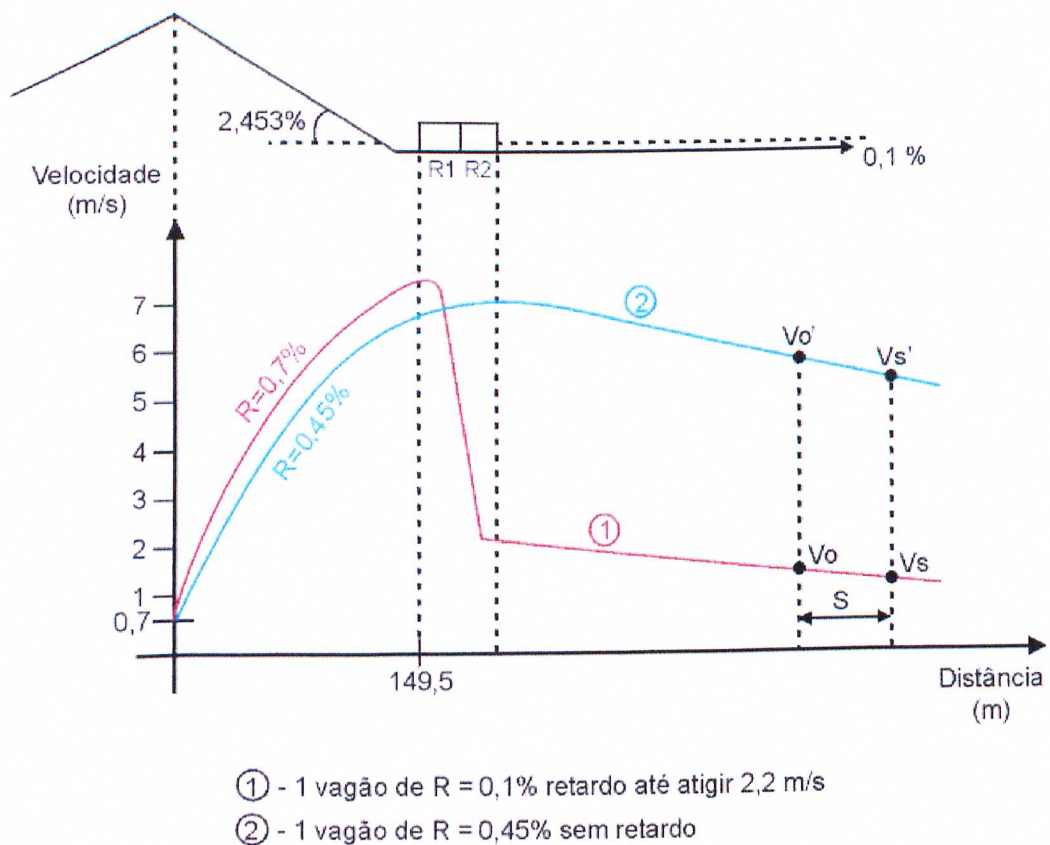


Figura A.13 – Curva de Velocidade de um Corte

Nas condições descritas acima pode-se integrar substituindo  $v$  por  $(V_s + V_o) / 2$  e supondo  $\overline{R_m}$  como a roabilidade média devido ao atrito mecânico.

$$\frac{1}{2}(V_s^2 - V_o^2) = g' \cdot S \cdot \theta - g' \cdot \overline{R}_m - g' \cdot S \cdot \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_s + V_o}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_s + V_o}{2} \right|$$

Ou seja:

$$\frac{1}{2}(V_s^2 - V_o^2) = g' \cdot S \cdot \left[ \theta - \overline{R}_m - \frac{Kf}{P} \left( w + \frac{V_s + V_o}{2} \right) \cdot \left| w + \frac{V_s + V_o}{2} \right| \right]$$

Onde:

- $V_o$  = velocidade dos vagões em  $x = 0$ ;
- $V_s$  = velocidade dos vagões em  $x = S$ ;
- $g'$  = aceleração da gravidade corrigida;
- $S$  = espaço percorrido ou a percorrer;
- $K = 0,06 \text{ kgfs}^2/\text{m}^4$ ;
- $f$  = área frontal do vagão;
- $\theta$  = gradiente da rampa;
- $\overline{R}_m$  = rolabilidade média devida ao atrito mecânico;
- $P$  = peso total dos vagões;
- $w$  = velocidade do vento na direção do trecho, sendo positivo se for contrário ao movimento.

Condições de validade da equação:

- o trecho considerado tem que ser reto;
- o valor de  $dx/dv$  deve ser constante ao longo do movimento.

Esta Equação A.8 é análoga à Equação A.7:  $\frac{1}{2}(V_s^2 - V_o^2) = g' \cdot S \cdot (\theta - \overline{R}_m - \overline{R}_a)$  obtida

através do método de conservação de energia, porém durante a sua dedução foi suposto um  $\overline{R}_m$  e  $\overline{R}_a$  sem nenhuma comprovação ou confirmação da validade da hipótese. Agora através do equacionamento descrito verifica-se que é válida.

LEIDO DIREITO AUTORAL  
 Todos os direitos reservados e protegidos  
 pela Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.  
 (A.8)

LEI DO DIREITO AUTORAL

Todos os direitos reservados e protegidos  
pela Lei 9.610/1998.

Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
transmitido sejam quais forem os meios  
empregados: eletrônicos, mecânicos,  
fotográficos ou quaisquer outros.

## **Anexo(s)**

## Anexo I – Tabelas do Sistema Original

Tabela de Rolabilidade - Tipo de Vagões

NUMVAGÕES	RRANK	TIPOOK	TIPORS	TIPORP	TIPOCI	TIPORE	TIPORC	TIPOGA	TIPOEX	TIPOVC
1	1	3,25	3,25	3,50	3,50	4,25	3,50	3,25	3,25	3,25
1	2	5,50	5,75	6,00	6,00	6,50	6,00	5,75	5,00	5,50
1	3	7,25	7,75	8,25	8,25	8,25	8,25	7,75	7,25	7,25
1	4	8,75	9,75	10,25	10,25	9,75	10,25	9,75	8,75	8,75
2	1	3,00	3,00	3,25	3,25	4,00	3,25	3,00	3,00	3,00
2	2	4,50	4,75	5,00	5,00	5,50	5,00	4,75	4,50	4,50
2	3	6,50	7,00	7,50	7,50	7,50	7,50	7,00	6,50	6,50
2	4	8,00	9,00	9,50	9,50	9,00	9,50	9,00	8,00	8,00
3	1	2,00	2,00	2,25	2,25	3,00	2,25	2,00	2,00	2,00
3	2	4,00	4,25	4,50	4,50	5,00	4,50	4,25	4,00	4,00
3	3	6,00	6,50	7,00	7,00	7,00	7,00	6,50	6,00	6,00
3	4	7,50	8,50	9,00	9,00	8,50	9,00	8,50	7,50	7,50
4	1	1,00	1,00	1,25	1,25	2,00	1,25	1,00	1,00	1,00
4	2	2,75	3,25	3,75	3,75	3,75	3,75	3,25	2,75	2,75
4	3	4,75	5,50	6,00	6,00	5,75	6,00	5,50	4,75	4,75
4	4	6,75	7,75	8,25	8,25	7,75	8,25	7,75	6,75	6,75
5	1	0,75	0,75	1,00	1,00	1,75	1,00	0,75	0,75	0,75
5	2	2,25	2,75	3,25	3,25	3,25	3,25	2,75	2,25	2,25
5	3	4,00	4,50	5,00	5,00	5,00	5,00	4,50	4,00	4,00
5	4	6,00	7,00	7,50	7,50	7,00	7,50	7,00	6,00	6,00

Tabela de Perda de Velocidade na Zona de Chave

NUMVAGÕES	CONSTANTES	LINHA1	LINHA2	LINHA3	LINHA4	LINHA5	LINHA6	LINHA7	LINHA8	LINHA9	LINHA10
1	Y	0,22000	0,21500	0,20500	0,20000	0,19500	0,19000	0,20000	0,21000	0,22000	0,23000
1	R-RANK1	0,17670	0,14820	0,12250	0,09100	0,09100	0,07690	0,07700	0,15390	0,15390	0,15400
1	R-RANK2	0,23370	0,20520	0,17950	0,14250	0,14200	0,12800	0,12800	0,22800	0,22800	0,22800
1	R-RANK3	0,40470	0,34770	0,29355	0,22800	0,22800	0,21375	0,21375	0,39900	0,39900	0,39900
1	R-RANK4	0,51870	0,43600	0,38190	0,31350	0,31350	0,29925	0,29925	0,51300	0,51300	0,51300
1	R-RANK5	0,57570	0,53580	0,50160	0,42750	0,42750	0,41325	0,41325	0,57000	0,57000	0,57000
2	Y	0,23000	0,22500	0,21500	0,21000	0,20500	0,20000	0,21000	0,22000	0,23000	0,24000
2	R-RANK1	0,12820	0,09700	0,07410	0,04275	0,04275	0,02850	0,02850	0,11115	0,11115	0,11115
2	R-RANK2	0,18520	0,15670	0,13110	0,09700	0,09700	0,08550	0,08550	0,17100	0,17100	0,17100
2	R-RANK3	0,26220	0,21375	0,18810	0,15675	0,15675	0,14250	0,14250	0,25650	0,25650	0,25650
2	R-RANK4	0,37620	0,31350	0,27645	0,21375	0,21375	0,19950	0,19950	0,37050	0,37050	0,37050
2	R-RANK5	0,52150	0,48450	0,43890	0,37100	0,37100	0,35825	0,35825	0,51300	0,51300	0,51300
3	Y	0,24000	0,23500	0,22500	0,22000	0,21500	0,21000	0,22000	0,23000	0,24000	0,25000
3	R-RANK1	0,05700	0,02560	-0,02850	-0,02850	-0,02850	-0,04275	-0,04275	0,03705	0,03705	0,03705
3	R-RANK2	0,08550	0,05410	0,02280	0,00000	0,00000	-0,01425	-0,01425	0,06270	0,06270	0,06270
3	R-RANK3	0,21370	0,17950	0,15105	0,12825	0,12825	0,11400	0,11400	0,19950	0,19950	0,19950
3	R-RANK4	0,31350	0,26500	0,22230	0,18525	0,18525	0,17100	0,17100	0,30780	0,30780	0,30780
3	R-RANK5	0,44170	0,38470	0,32490	0,27070	0,27075	0,25650	0,25650	0,43605	0,43605	0,43605
4	Y	0,25000	0,24500	0,23500	0,23000	0,22500	0,22000	0,23000	0,24000	0,25000	0,26000
4	R-RANK1	0,00000	-0,03420	-0,05985	-0,08550	-0,08550	-0,09750	-0,09750	-0,03135	-0,03135	-0,03135
4	R-RANK2	0,04270	0,01140	-0,01710	-0,04275	-0,04275	-0,05700	-0,05700	0,01710	0,01710	0,01710
4	R-RANK3	0,17100	0,13680	0,11115	0,08550	0,08550	0,07125	0,07125	0,15105	0,15105	0,15105
4	R-RANK4	0,25650	0,22230	0,19380	0,15675	0,15675	0,14250	0,14250	0,25080	0,25080	0,25080
4	R-RANK5	0,37050	0,32770	0,28215	0,22800	0,22800	0,21375	0,21375	0,36480	0,36480	0,36480
5	Y	0,26000	0,25500	0,24100	0,24000	0,23500	0,23000	0,24000	0,25000	0,26000	0,27000
5	R-RANK1	-0,02850	-0,06270	-0,09120	-0,11400	-0,11400	-0,12825	-0,12825	-0,05985	-0,05985	-0,05985
5	R-RANK2	0,02850	-0,05700	-0,03420	-0,05700	-0,05700	-0,07125	-0,07125	0,00000	0,00000	0,00000
5	R-RANK3	0,12825	0,09405	0,06550	0,04275	0,04275	0,02850	0,02850	0,09750	0,09750	0,09750
5	R-RANK4	0,22800	0,19380	0,16530	0,14250	0,14250	0,12825	0,12825	0,22230	0,22230	0,22230
5	R-RANK5	0,32770	0,28215	0,23940	0,19950	0,19950	0,18525	0,18525	0,32205	0,32205	0,32205

Tabela de Rolabilidade - Equação de Davis

LINHA	CONSTANTE	NUM. VAGOES (1~2)	NUM. VAGOES (3~4)	NUM. VAGOES (5~6)	NUM. VAGOES (7~8)	NUM. VAGOES (9~10)
1	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
1	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
1	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
1	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
2	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
2	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
2	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
2	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
3	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
3	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
3	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
3	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
4	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
4	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
4	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
4	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
5	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
5	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
5	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
5	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
6	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
6	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
6	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
6	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
7	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
7	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
7	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
7	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
8	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
8	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
8	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
8	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
9	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
9	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
9	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
9	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537
10	X0	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078	0,30078
10	A0	0,09985	0,50000	1,09985	1,40000	1,75000
10	B	0,08520	0,06590	0,05266	0,03418	0,02563
10	C	0,00952	0,00880	0,00650	0,00586	0,00537



Tabela do Notch Inicial Aplicado

RETARDADOR	CLIMA	PESO MEDIO	QTD. VAGOES	NOTCH INICIAL
1	0	1	1	1
1	0	1	2	2
1	0	1	3	2
1	0	1	4	2
1	0	1	5	3
2	0	1	1	1
2	0	1	2	1
2	0	1	3	2
2	0	1	4	2
2	0	1	5	3
3	0	1	1	1
3	0	1	2	1
3	0	1	3	1
3	0	1	4	2
3	0	1	5	3
1	1	1	1	1
1	1	1	2	1
1	1	1	3	2
1	1	1	4	2
1	1	1	5	3
2	1	1	1	1
2	1	1	2	1
2	1	1	3	2
2	1	1	4	2
2	1	1	5	3
3	1	1	1	1
3	1	1	2	1
3	1	1	3	2
3	1	1	4	2
3	1	1	5	3
1	0	2	1	1
1	0	2	2	1
1	0	2	3	2
1	0	2	4	2
1	0	2	5	3
2	0	2	1	1
2	0	2	2	1
2	0	2	3	2
2	0	2	4	2
2	0	2	5	3
3	0	2	1	1
3	0	2	2	1
3	0	2	3	2
3	0	2	4	2
3	0	2	5	3
1	1	2	1	1
1	1	2	2	2
1	1	2	3	2
1	1	2	4	2
1	1	2	5	3
2	1	2	1	1
2	1	2	2	2
2	1	2	3	2
2	1	2	4	2
2	1	2	5	3
3	1	2	1	1
3	1	2	2	1
3	1	2	3	2
3	1	2	4	2

Todos direitos reservados e protegidos  
 pelo Lei 9.610/1998.  
 Este arquivo não pode ser reproduzido ou  
 transmitido sejam quais forem os meios  
 empregados: eletrônicos, mecânicos,  
 fotográficos ou quaisquer outros.