

SIMULAÇÃO DIGITAL DE
SISTEMAS FERROVIÁRIOS ELETRIFICADOS
EM CORRENTE CONTÍNUA

Autor - FERNANDO URBANO
Orientador - ALCIR JOSÉ MONTICELLI

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA/ELETRÔNICA

1977

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS

Desejo registrar a minha gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial

a Alcir José Monticelli, que, na qualidade de Orientador, colocou-se à disposição, para que realizássemos um trabalho acadêmico e profícuo;

a Brian Stott, pelo incentivo e sugestões para o desenvolvimento desta tese;

à Ferrovias Paulistas S.A., que gentilmente cedeu dados e pessoal técnico, para que este estudo tivesse uma aplicação prática;

à General Electric do Brasil S.A., na pessoa de seu Gerente de Produção, Engº Fernando A. Cavazzoni;

à Maria Júlia Dini, pelo zeloso e eficiente trabalho datilográfico.

SUMÁRIO

É desenvolvido um algoritmo para a simulação digital de sistemas ferroviários eletrificados em corrente contínua. As principais vantagens do método são versatilidade e desempenho computacional, sendo moldável ao estudo de redes ferroviárias eletrificadas, em níveis de planejamento e operação.

ABSTRACT

An algorithm for digital simulation of DC railway systems is developed in this study. Its main advantages are versatility and computational performance and it can be applied to operation and planning aspects of railway systems studies.

ÍNDICE

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

CAPÍTULO II

2 - O SISTEMA ELETRIFICADO EM CORRENTE CONTÍNUA

2.1 - Introdução

2.2 - Alimentação do Sistema

2.2.1 - Alimentação das Sub-estações

2.2.2 - Alimentação das Linhas de Contato

2.3 - Quedas de Tensão

2.3.1 - Resistência do Circuito de Tração

2.3.2 - Exemplo de Quedas de Tensão

2.4 - Sub-estações de tração

2.4.1 - Transformador Abaixador

2.4.2 - Grupos Conversores Trifásico- Con tínuo

2.5 - Locomotivas Elétricas

2.5.1 - Motor de Tração tipo série

2.5.1.1 - Curvas Características do Motor Série

2.5.1.2 - Funcionamento do Mo tor Série

2.5.2 - Circuito de Potência das Locomo tivas

2.5.3 - Partida e Aceleração de uma Loco motiva

2.5.4 - Frenagem Regenerativa de uma Lo comotiva

2.5.4.1 - Características $F(V)$ de Frenagem Regenerativa

CAPÍTULO III

3 - A SIMULAÇÃO DO SISTEMA FERROVIÁRIO

3.1 - Diagrama de Blocos

3.2 - Entrada de Dados

3.3 - Desempenho Básico dos Trens no Percurso

3.4 - Acoplamento do Esquema Operacional ao Esquema Elétrico do Sistema

3.4.1 - A Lógica da Movimentação dos Trens

CAPÍTULO IV

4 - A SIMULAÇÃO ELETRO-MECÂNICA

4.1 - Características do Material Rodante e do Equipamento Elétrico

4.1.1 - Material Rodante

4.1.2 - Equipamento Elétrico

4.2 - Características dos Perfis

4.3 - Acoplamento Dinâmico do Trem com a via

4.3.1 - Resistência ao Avanço

4.3.2 - Resistência devido às curvas

4.3.3 - Resistência devido à gravidade

4.4 - A Equação Dinâmica

4.4.1 - As Equações do Movimento

4.4.2 - A Solução Numérica

4.4.3 - A Função Velocidade-Deslocamento

CAPÍTULO V

5 - O FLUXO DE CARCA

5.1 - A Equação Terminal da Locomotiva

5.1.1 - O Algoritmo para a Determinação das Características Terminais

5.1.2 - A Forma das Equações não-linea
res

5.2 - As Equações do Sistema Eletrificado

5.3 - O Método Iterativo Newton-Raphson

5.4 - O Algoritmo Básico para o Cálculo do
Fluxo de Carga

CAPÍTULO VI

6 - A APLICAÇÃO PRÁTICA

6.1 - Dados Relativos ao Esquema Operacional

6.2 - Dados Relativos ao Esquema Elétrico

6.3 - O Perfil da Via

6.3.1 - A Vista em Planta

6.3.2 - A Vista no Perfil Longitudinal

6.4 - Informações Relativas aos Trens

6.4.1 - Elemento Trator

6.4.2 - Elementos Rebocados

6.5 - As Simulações Básicas dos Movimentos
dos Trens nos Percursos

6.6 - Os Resultados da Aplicação Prática

CAPÍTULO VII

7 - CONCLUSÕES

APÊNDICE A

APÊNDICE B

APÊNDICE C

APÊNDICE D

APÊNDICE E

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO I

Do ponto de vista energético, entre outros, são conhecidas as vantagens de um sistema de transporte ferroviário, em comparação com o transporte rodoviário. Vantagens adicionais podem ser obtidas através de um sistema ferroviário eletrificado, tanto pela possibilidade de utilização da energia fornecida pela rede de distribuição, como pela utilização da regeneração elétrica. A eficiência de um sistema eletrificado, entretanto, depende do planejamento da rede de alimentação e do modo de operação da ferrovia. Este tipo de planejamento envolve a simulação eletro-mecânica de todo o sistema ferroviário.

Este trabalho tem por objetivo uma simulação digital de um sistema eletrificado em corrente contínua. É moldável ao estudo de redes ferroviárias, em níveis de planejamento e operação, apresentando vantagens por sua versatilidade e desempenho computacional (tempo e memória).

No Capítulo II é dado um resumo das características básicas de um sistema ferroviário eletrificado em corrente contínua (1), bem como uma descrição do funcionamento dos principais tipos de locomotivas C.C. atualmente em uso no Brasil.

O algoritmo geral usado neste estudo, está descrito no Capítulo III, e reúne em blocos as principais peças para o acoplamento dos esquemas operacional e elétrico do sistema ferroviário eletrificado.

O Capítulo IV descreve o desempenho básico de um trem elétrico em um perfil, considerando o comportamento eletro-mecânico da composição na via. Como a via tem papel decisivo no procedimento do trem, um pré-simulador descreve-a de forma a representar a real situação do perfil. As características elétricas dos motores de tração, também são descritas por pré-simuladores, através das informações fornecidas pelos fabricantes.

O Capítulo V concentra o objetivo primordial do trabalho: o fluxo de carga. O acoplamento elétrico das fontes de alimentação (sub-estações) com as cargas móveis (trens), é realizado através de um sistema de equações algébricas não lineares,

que é resolvido iterativamente por um método Newton-Raphson convencional. Como o sistema ferroviário eletrificado em C.C., mesmo quando em malha, apresenta uma matriz-admitância nodal bastante esparsa, a resolução por triangularização proposta por Tinney (15), é adaptada ao método, resultando vantagens de rapidez e economia de memória.

A aplicação prática deste trabalho se encontra no Capítulo VI, e se desenvolve em um trecho eletrificado em C.C. pertencente à FEPASA.

As conclusões estão reunidas no Capítulo VII.

O Apêndice A apresenta um algoritmo de regressão não-linear, baseado no método dos mínimos quadrados, usado para obter-se matematicamente as características das locomotivas.

O Apêndice B mostra a solução de equações algébricas lineares, através da aplicação de operações elementares sobre matrizes esparsas. São mostradas também as formas de se obter maior economia de memória e menor esforço computacional, através de critérios de renumeração dos nós.

No Apêndice C mostra-se o algoritmo utilizado para se obter as características $F(V)$, a partir das curvas experimentais fornecidas pelos fabricantes.

O desempenho básico de um trem aplicado em um caso real é mostrado no Apêndice D. Utilizando-se do mesmo trecho da aplicação prática, apresenta-se o desempenho de um trem padrão nos sentidos importação e exportação.

No Apêndice E são mostrados algumas saídas de simulações da aplicação prática deste trabalho, com variações dos despachos, objetivando uma melhora do desempenho elétrico do sistema em estudo.

CAPÍTULO II

2 - O SISTEMA ELETRIFICADO EM CORRENTE CONTÍNUA

Neste capítulo será dada uma visão geral do sistema ferroviário eletrificado em corrente contínua.

2.1 - INTRODUÇÃO

Inicialmente convém definir-se o que representa um sistema eletrificado em corrente contínua, ou seja, o circuito de tração.

Basicamente compõe-se de uma fonte de energia, uma linha de contato, uma locomotiva que utiliza a corrente, e um condutor de retorno.

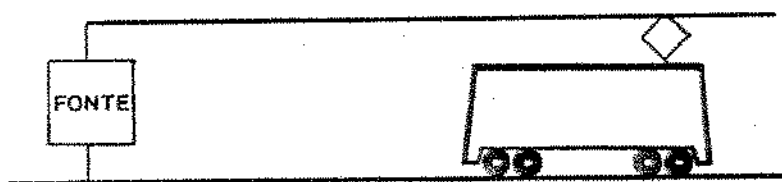


Figura 2.1

A fonte não é propriamente uma central de geração, mas sim um elo de ligação entre o sistema de transmissão C.A. e a via férrea eletrificada. Como o domínio de alimentação desta fonte, também chamada sub-estação (S/E), é limitado, há ao longo de uma linha eletrificada muitas sub-estações convenientemente espaçadas.

O problema geral de um circuito de tração, pode ser tratado como dois problemas em separado:

- 1) o transporte de energia até o pantógrafo da locomotiva.
- 2) a utilização desta energia em um elemento motor.

Os itens que seguem elucidarão melhor estes problemas.

2.2 - ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA

As tensões nominais admitidas e atualmente em uso no Brasil são 600, 750, 1500 e 3000 volts C.C. para ferrovias (18). Estas tensões relativamente baixas são impostas pelo ta

manho físico dos elementos motores, pois para tensões superiores a 3000 volts, fica muito difícil acomodar no espaço disponível, as máquinas auxiliares que alimentam os compressores, ventiladores, assim como a isolação de todos equipamentos na locomotiva.

Com tensões desta ordem de grandeza, as sub-estações de alimentação ficam distribuídas com intervalos de separação bastante pequenos, o que justifica a existência de um grande número destas fontes.

2.2.1 - Alimentação das Sub-estações

O esquema geral é aquele que dispõe de um barramento de alta tensão, alimentando várias sub-estações através de uma ou mais linhas de transmissão, de acordo com a capacidade ou segurança que a alimentação exige.

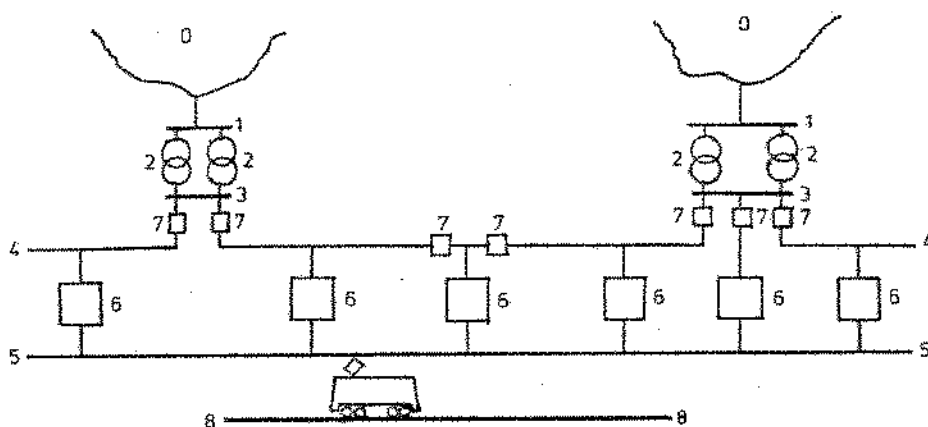


Figura 2.2

- 0 Sistema público
- 1 barramento de alta tensão (chegada)
- 2 sub-estação abaixadora
- 3 barramento de baixa tensão (partida ou envio)
- 4 linha de transmissão C.A. (sistema primário)
- 5 linha de contato C.C. (catenaria)
- 6 sub-estações conversoras
- 7 disjuntores de linha
- 8 linha de retorno (trilhos)

As linhas de transmissão C.A. (sistema primário) se originam dos barramentos de envio de sub-estações abaixadoras, e se estendem, na maioria das vezes, radialmente até o encontro com outras linhas, conforme mostra o esquema da figura 2.2. A existência de disjuntores no encontro destas linhas se faz necessãrio pelo fato de que os barramentos de envio nunca estão com os mesmos ângulos, o que poderia tornar esta linha, cuja função é alimentar as sub-estações, em linha de transmissão do próprio sistema público.

Segue-se alguns esquemas mais comuns de alimentação, com uma ou duas linhas de Alta Tensão (1).

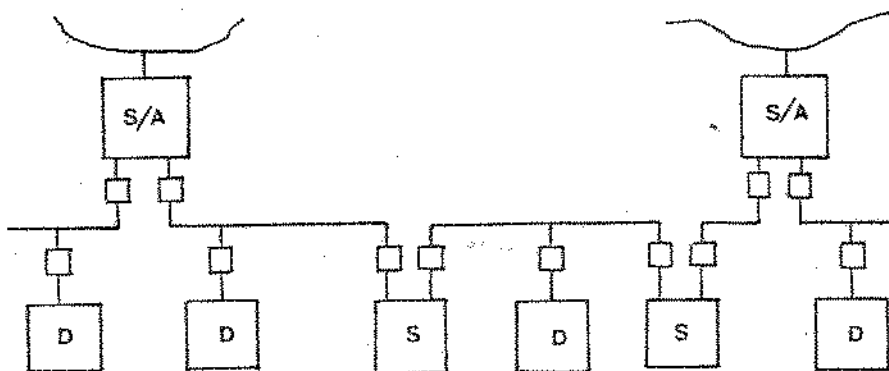


Figura 2.3

No esquema da figura 2.3 há apenas um circuito de transmissão, e um defeito de linha priva de corrente as sub-estações em derivação, situadas entre duas em seccionamento.

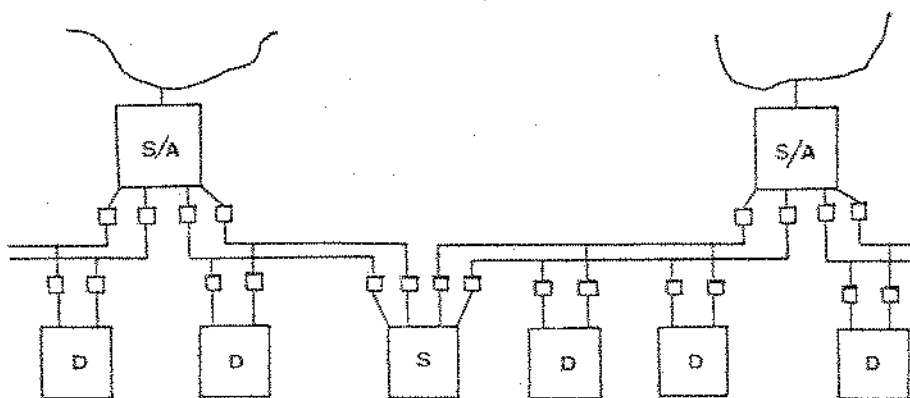


Figura 2.4

O esquema da figura 2.4 é o que representa maior segurança e confiabilidade, pois cada sub-estação está sempre interligada aos dois circuitos de transmissão através do barramento de alta tensão e disjuntores. Em caso de defeito em um dos circuitos há um desequilíbrio entre as correntes que passam pelos disjuntores, o que faz um deles atuar bloqueando a falha, mas garantindo a continuidade do serviço.

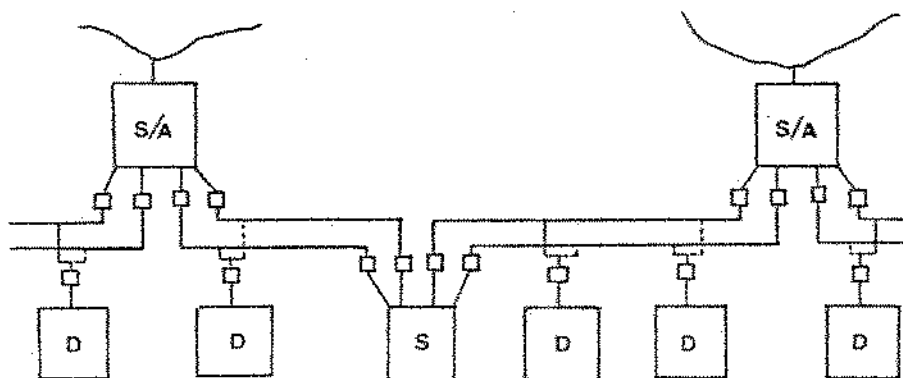


Figura 2.5

O esquema da figura 2.5 é por dois circuitos, mas com uma disposição bastante econômica; nas sub-estações em derivação há apenas um disjuntor ligado alternadamente aos dois circuitos.

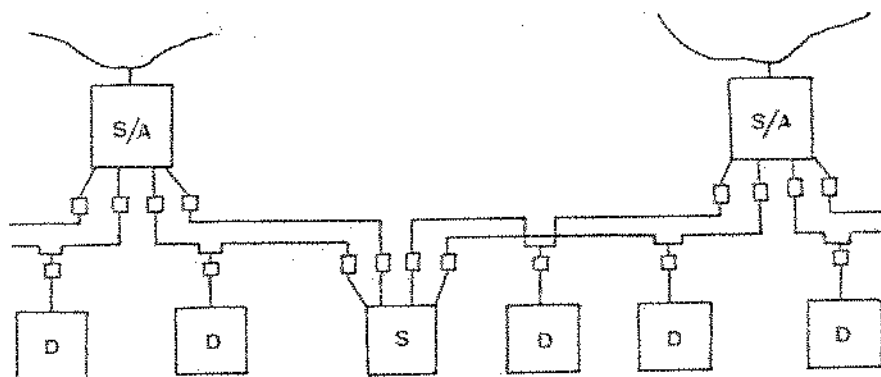


Figura 2.6

O esquema da figura 2.6 também é bastante viável pela garantia de fornecimento, mas apresenta como inconveniente o fato de que as sub-estações precisam estar bastante próximas.

Em todos os esquemas anteriores, fica sempre subentendido a atuação dos disjuntores para o seccionamento da linha (disjuntores de linha).

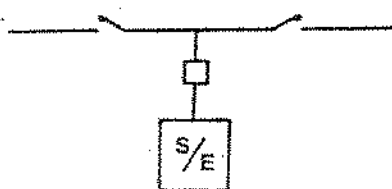


Figura 2.7

2.2.2 - Alimentação das Linhas de Contato

Para completar a descrição dos esquemas de alimentação até os pantógrafos das locomotivas, resta analisar os esquemas das linhas de contato.

A alimentação da linha de contato por duas ou mais sub-estações, é sistemática em corrente contínua, ou seja, uma locomotiva recebe a corrente das sub-estações mais próximas.

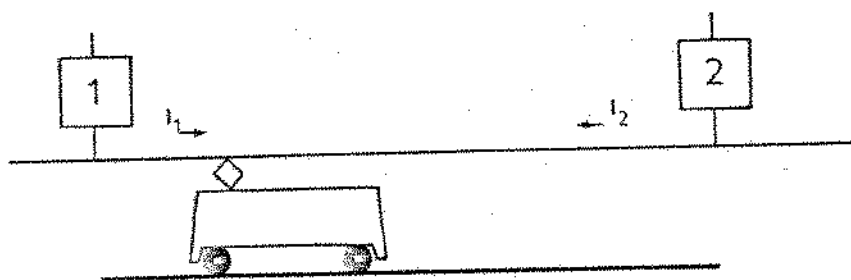


Figura 2.8

Em vias duplas há interesse em se fazer com que as duas linhas de contato participem da alimentação; assim, é feita uma ligação entre pontos médios das linhas, colocando-as em curto circuito. Desta forma a locomotiva recebe a corrente por quatro caminhos distintos, o que sensivelmente reduz as quedas de tensão.

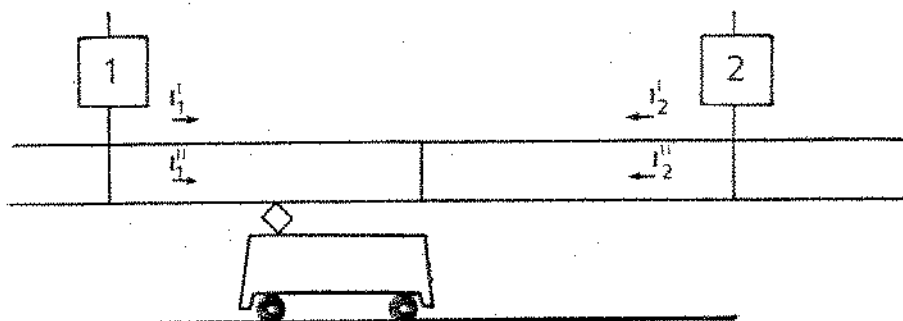


Figura 2.9

Um esquema prático e que será utilizado no capítulo VI, consiste em curto-circuitar as linhas em intervalos equidistantes e bastante próximos, garantindo quedas de tensão muito menores.

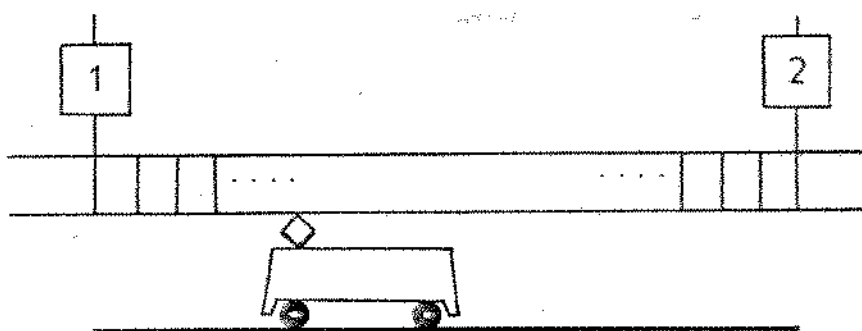


Figura 2.10

2.3 - QUEDAS DE TENSÃO

Entre as sub-estações de alimentação e as locomotivas, existe uma queda de tensão que depende da intensidade de corrente absorvida, e da impedância das linhas em questão.

No problema da determinação do equipamento de linha, a distância entre sub-estações, e eventualmente a seção da linha de contato, são as incógnitas básicas do problema, pois as condições de tensão média ao longo do percurso, e valor mínimo admissível, devem ser simultaneamente obedecidas.

VALORES PADRONIZADOS PELA U.I.C.

MÍNIMO	NOMINAL	MÁXIMO
500 V.	750 V.	900 V.
1000 V.	1500 V.	1800 V.
2000 V.	3000 V.	3600 V.

2.3.1 - Resistência do Circuito de Tração

A resistência específica (ρ) do circuito de tração (catenária + retorno), depende basicamente da secção de catenária e do tipo de trilhos.

Por secção de catenária, entende-se a secção equivalente de cobre (S), que tenha a mesma condutância da catenária. A resistência por quilometro da catenária fica praticamente dada pelo valor $\frac{18,8}{S}$ a 40°C (S em mm²). (1)

A resistência do circuito de retorno, depende não somente do tipo de trilho, como também da resistência suplementar introduzida pelos pinos de fixação entre os sucessivos dormentes; depende ainda da resistência de isolamento da via em relação ao solo, que permite uma maior ou menor corrente de retorno pela terra. Na prática utiliza-se com razoável aproximação, a relação empírica $\frac{0,9}{p}$ (p=peso em kg/m de trilho). (1).

2.3.2 - Exemplo de Quedas de Tensão

Para elucidar melhor o que significa a queda de tensão em um sistema ferroviário eletrificado, vamos recorrer a um exemplo prático (que será desenvolvido com detalhes nos capítulos seguintes).

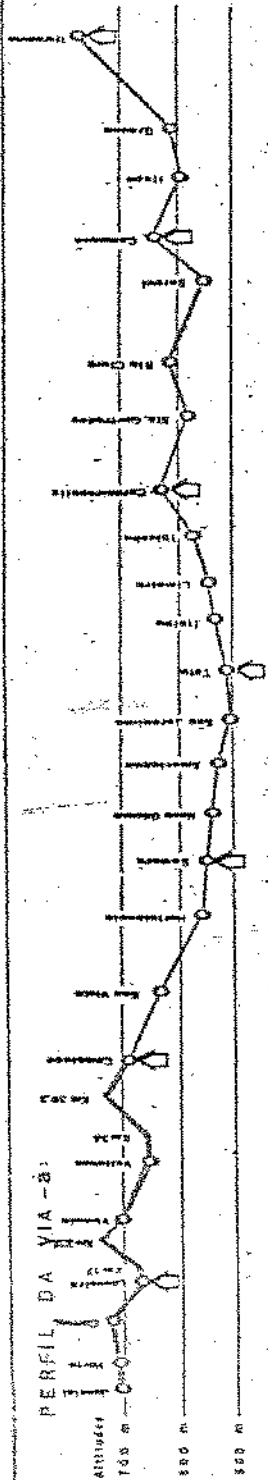
RELÓGIO

ESTUDO ENERGÉTICO

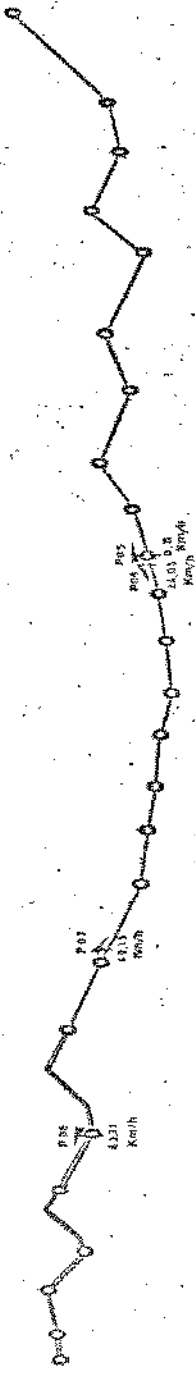
CONVENÇÕES

- LINHA DUPLA
- LINHA SINGELA
- ESTACÃO
- MARCO
- SUB-ESTAÇÃO
- TREM
- CORRENTE

HORA
11.0 9.0



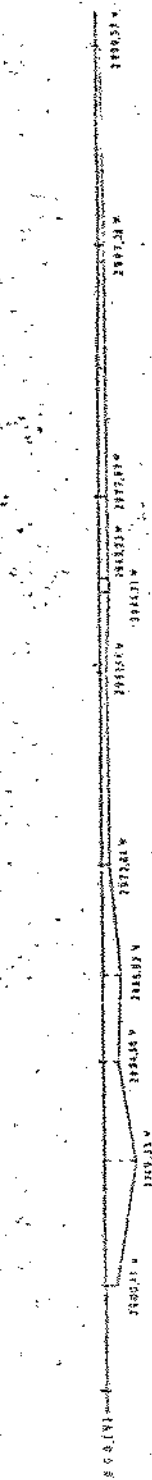
PERFIL DOS TRENS -b-



PERFIL DAS CORRENTES -c-



PERFIL DAS TENSÕES -d-



0 50 100
KILÔMETROS

Figura 2.11

Do esquema (a) da figura 2.11 pode-se notar que as sub-estações estão espaçadas a uma distância média de 25 a 30 km., alimentando a linha de contato.

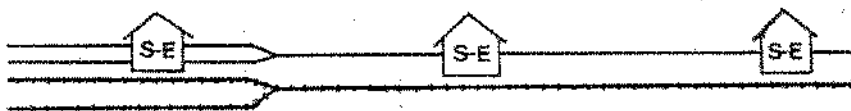


Figura 2.12

Deve-se observar ainda que até um certo trecho a via é dupla, e conseqüentemente a resistência quilométrica do circuito de tração fica menor.

Através de métodos que serão demonstrados nos capítulos seguintes, obtem-se a configuração dos trens na via (esquema (b) - figura 2.11), como também as correntes absorvidas, acopladas às condições do circuito de tração (esquema (c) - figura 2.11).

Utilizando-se de métodos matriciais, obtem-se as quedas de tensão em todos os elementos eletricamente ativos do sistema, estabelecendo-se um perfil de tensão como o mostrado no esquema (d) da figura 2.11.

2.4 - SUB-ESTAÇÕES DE TRACÇÃO

As sub-estações de tração são vários pontos de passagem de energia, entre o sistema primário e o sistema ferroviário eletrificado. Elas operam interligando a linha de transmissão em alta tensão (sistema primário), responsável pelo fornecimento da energia primária, com a catenária (sistema ferroviário eletrificado). Em uma sub-estação de tração são encontrados:

- um barramento de alta tensão ligado ao sistema primário
- um ou mais grupos de tração que transforma corrente alternada em contínua

- um barramento de envio das correntes de tração a través das linhas de contato

O órgão essencial em uma sub-estação de tração é o que se denomina Grupo de Tração; na verdade é um conjunto constituído por um transformador trifásico abaixador de tensão, e uma máquina ou aparelho que permite converter a corrente trifásica em contínua.

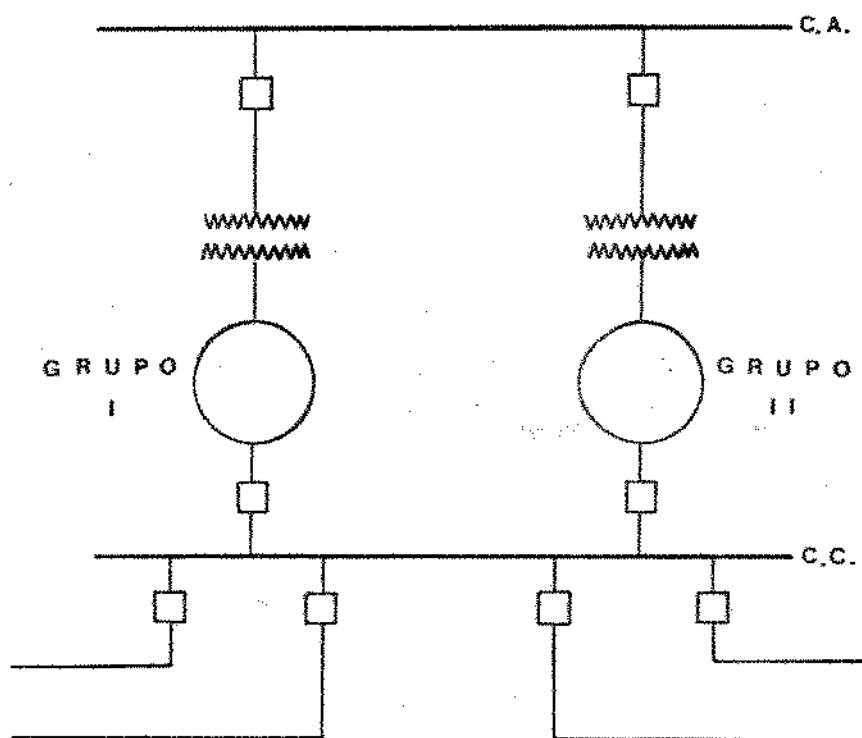


Figura 2.13

2.4.1 - Transformador Abaixador

Os transformadores usados podem ser do tipo refrigerado a óleo, água ou ar. O refrigerado a água tem um tamanho excessivo, por ter a água circu^lante em uma bobina especial submersa em óleo; o re^frigerado a ar é usado para tensões superiores ou igual a 33 kv, apresentando como inconveniente a ne^cessidade de equipamentos auxiliares para seu funcioⁿamento; o transformador refrigerado a óleo é o que melhor se adapta às condições, por ter um custo infe^rior e ocupar um espaço físico relativamente menor.

Os transformadores podem ser do tipo trifá^ssico ou três unidades mono-fásicos associadas em um

banco; esta associação é sempre preferível para pequenas instalações, pois o custo de manutenção fica bastante reduzido.

Ressalte-se ainda o uso comum de transformadores com quatro derivações de 2 1/2% nos enrolamentos de alta, visando eliminar as possíveis diferenças de tensão entre a geração (sistema público) e as diversas sub-estações.

2.4.2 - Grupos Conversores Trifásico-Contínuo

O equipamento conversor C.A. - C.C. mais antigo é o grupo "Motor-Gerador": um motor síncrono trifásico acoplado a um ou dois geradores de corrente contínua. Logo após apareceram as "Comutatrizes", que uniam em uma só máquina um motor síncrono e um gerador de corrente contínua. A seguir, os "Retificadores a Vapor de Mercúrio" substituíram com êxito seus predecessores. Atualmente, com o advento dos semi-condutores, empregam-se os "Retificadores de Silício", que apresentam um ótimo rendimento e são mais versáteis. (12).

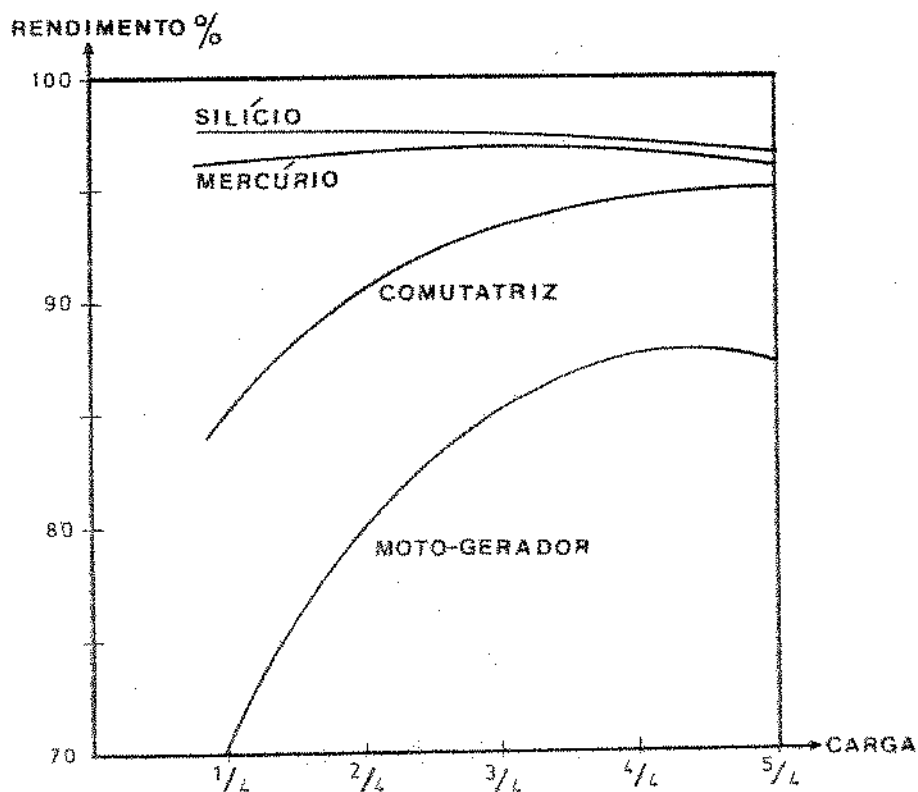


Figura 2.14

2.5 - LOCOMOTIVAS ELÉTRICAS

Durante muitos anos projetaram-se novos tipos de locomotiva, que utilizasse a energia elétrica como fonte básica de alimentação, visando satisfazer as necessidades ferroviárias.

As locomotivas elétricas convencionais em corrente contínua são basicamente construídas com motores C.C. tipo série, e dependendo da utilização a que se destinam podem operar em sistemas eletrificados a 600, 750, 1200, 1500, 2400 ou 3000 volts. Em todos os casos, cada motor deve ser adequadamente isolado para a tensão nominal empregada. Nas tensões mais elevadas dois ou mais motores são operados em série.

Os motores de tração em uma locomotiva elétrica são responsáveis pelas seguintes funções:

- i) partida do trem
- ii) regulação das velocidades
- iii) eventualmente, frenagem elétrica

2.5.1 - Motor de Tração tipo série

Os motores a coletores são ainda hoje universalmente empregados, pois alimentados por tensão contínua regulável pelos enrolamentos de excitação série, se adaptam muito bem às condições de utilização habituais em tração.

As bobinas de excitação série constituídas por vários condutores de larga secção, são robustas, pois para o caso de variações brutais da tensão de linha, como frequentemente ocorre na alimentação em tração, o motor de excitação série responde perfeitamente ao esforço de tração solicitado.

As três equações fundamentais para este tipo de máquina elétrica de corrente contínua são:

$$U = E + rI \quad (2.1)$$

$$E = K_1 N \Phi \quad (2.2)$$

$$C = K_2 \Phi I \quad (2.3)$$

onde:

U - tensão de alimentação (volts)

E - força contra eletromotriz do motor (volts)

I - corrente no induzido (amperes)

r - resistência do indutor e induzido (ohms)

ϕ - fluxo por polo (webers)

N - velocidade de rotação (rps)

C - conjugado eletromagnético do motor (joules)

$\left. \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \end{matrix} \right\}$ constantes da máquina

Das equações fundamentais:

$$N = \frac{1}{K_1} \frac{U - rI}{\phi} \quad (2.4)$$

e

$$C = K_2 \phi I$$

analisando estas relações conclue-se que a velocidade pode variar em função da carga

i) por efeito da queda ohmica rI

ii) por efeito do fluxo ϕ

No motor série, o fluxo ϕ depende diretamente da carga, pois súbitas variações nela acarretam sensíveis modificações na velocidade.

2.5.1.1 - Curvas Características do Motor Série

A figura 2.15 representa a característica $E(I)$ da saturação em carga de um motor C.C. tipo série, obtida em ensaios de laboratório para uma determinada velocidade de referência (ver Apêndice C).

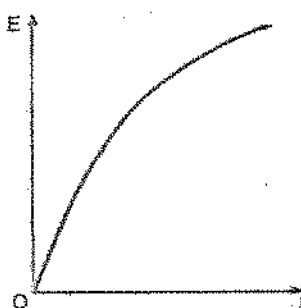


Figura 2.15

Para uma velocidade N_1 de referência, seja $E_1(I)$ a curva característica obtida para esta velocidade.

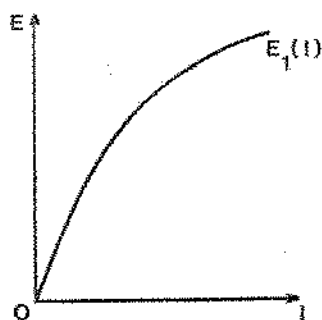


Figura 2.16

Para uma velocidade N qualquer:

$$N = N_1 \frac{U - rI}{E_1(I)} \quad (2.5)$$

Portanto, fixando-se um valor de U , e conhecendo-se a característica $E_1(I)$, obtém-se a função $I(N)$.

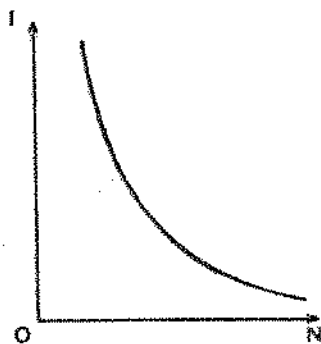


Figura 2.17

Da relação eletro-mecânica $2\pi NC = EI$, obtém-se a equação

$$C = \frac{1}{2\pi} \frac{I \cdot E}{N} \quad (2.6)$$

e a característica $C(I)$ fica então dada por

$$C = \frac{1}{2\pi} \frac{I \cdot E_1(I)}{N_1} \quad (2.7)$$

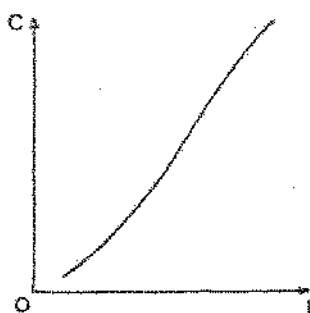


Figura 2.18

Finalmente a função $C(N)$ que se obtem a partir das curvas $I(N)$ e $C(I)$ anteriormente deduzidas, e que representa a característica fundamental do motor para a sua utilização em tração.

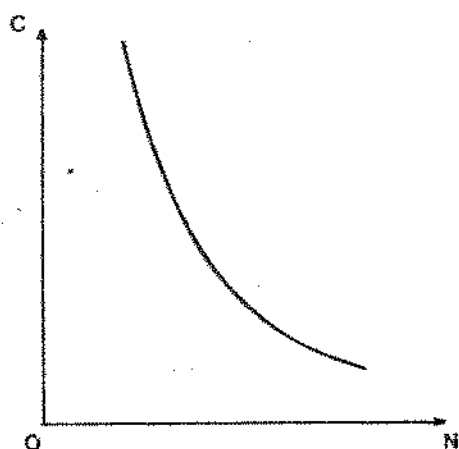


Figura 2.19

2.5.1.2 - Funcionamento do Motor série

A figura 2.20 mostra o esquema fundamental para o funcionamento de um motor a excitação série usado em locomotivas.

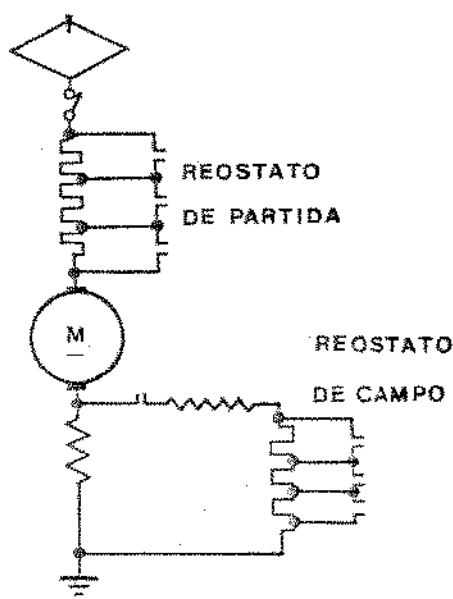


Figura 2.20

Em baixa velocidade, não se pode aplicar toda a tensão de linha aos terminais do motor, pois ele terá uma força contra eletromotriz insuficiente e provocará uma corrente excessiva.

Conforme se pode constatar do esquema fundamental, deve-se alimentar o motor série por uma tensão que aumente progressivamente durante a partida, até que toda tensão de linha fique aplicada aos seus terminais.

Este esquema tem sido utilizado por mais de meio século nos veículos de corrente contínua, sendo que atualmente estão sendo substituídos por equipamentos eletrônicos, com bases em células de silício ("chopper control").

2.5.2 - Circuito de Potência das Locomotivas

A apresentação inicial de um motor de tração se faz pela sua curva característica $C(N)$; através de uma relação de transmissão, ou seja, uma mudança de coordenadas, se chega à curva característica $F(V)$ da locomotiva.

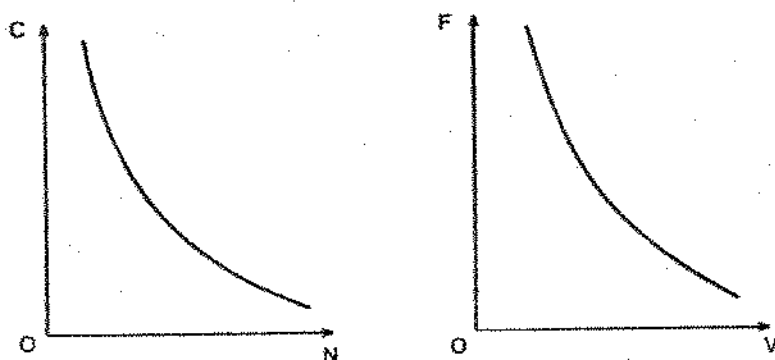


Figura 2.21

Traçando-se igualmente a curva do esforço resistente do trem sobre um dado perfil, pode-se prever situações diferentes de acordo com a inclinação da via.

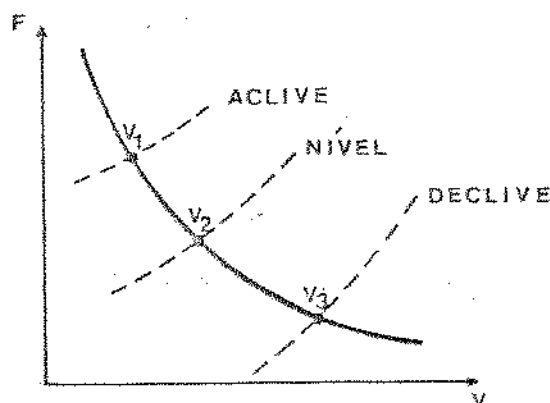


Figura 2.22

Assim, como estas características são únicas, não é possível obter-se a mesma velocidade de equilíbrio para perfis diferentes; daí ser necessário o deslocamento da curva característica para satisfazer as diferentes situações que a via apresenta. Obter estas variações é a função básica do equipamento de tração.

Em corrente contínua, agindo-se sobre a excitação dos motores se consegue os deslocamentos da característica fundamental; entretanto tais deslocamentos são gradativos, não podendo exceder a um certo limite.

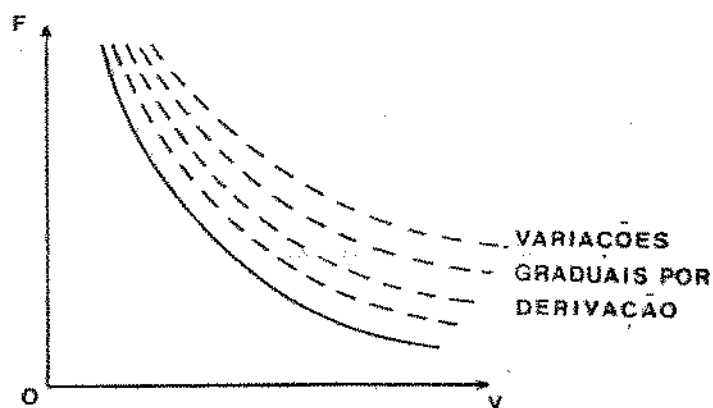


Figura 2.23

Entretanto, o plano $F(V)$ não fica totalmente varrido para satisfazer a todas situações do perfil. O artifício clássico usado consiste em acoplar-se os motores sob tensão total U , em várias combinações possíveis (ver Apêndice c).

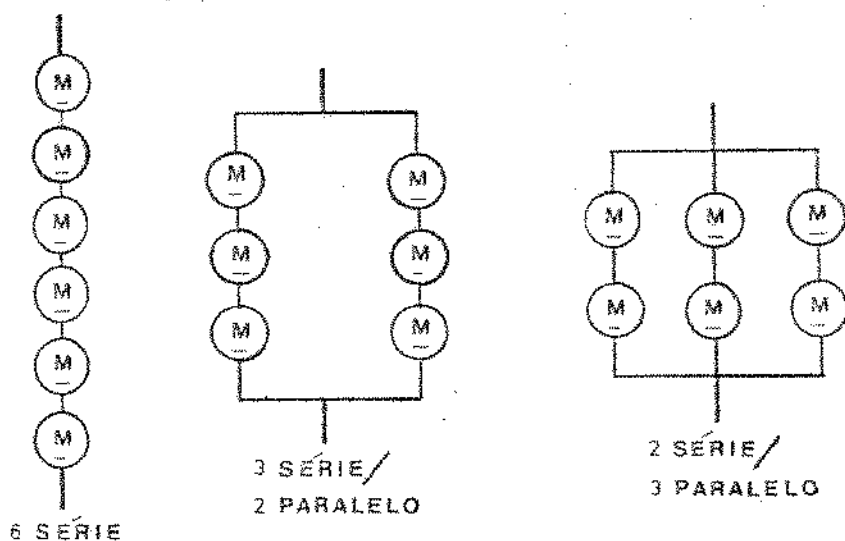


Figura 2.24

também são acionadas pelo equipamento de controle:

- i) ventilação dos motores de tração
- ii) fornecimento do ar comprimido necessário para frenagem hidráulica
- iii) circulação e resfriamento dos transformadores
- iv) iluminação da locomotiva e do trem
- v) proteção contra curto-circuito
- vi) fornecimento de baixa tensão para a ali mentação dos circuitos de controle

2.5.3 - Partida e Aceleração de uma Locomotiva

O problema na partida é manter-se a intensidade de corrente absorvida pelo motor a um valor aceitável, ou mesmo igual ao máximo especificado pelo fabricante, para que a locomotiva desenvolva o maior esforço trator possível; em geral a intensidade de corrente fica compreendida entre dois valores I e I' vizinhos, e que correspondem aos valores F e F' do esforço trator.

I - limite por construção do motor

F - limite por aderência

Para $N_1 = 0$ (velocidade zero), resistência R_1 correspondente ao arranque inicial sob corrente I , a equação terminal da máquina fica:

$$U - (r + R_1) I = 0 \quad (2.8)$$

Na situação prática segue-se uma diminuição da corrente I para um valor I' e um aumento da velocidade para N_2 , visto que há o aparecimento da força contra-eletromotriz E .

A atitude seguinte então, é passar-se a uma resistência R_2 ($R_2 < R_1$) para se ter novamente a intensidade I e dispor da mesma força F .

Generalizando este raciocínio sobre uma curva característica $I(N)$:

A cada acoplamento dos motores corresponde uma característica $F(V)$ diferente, e outras variações devido a derivação.

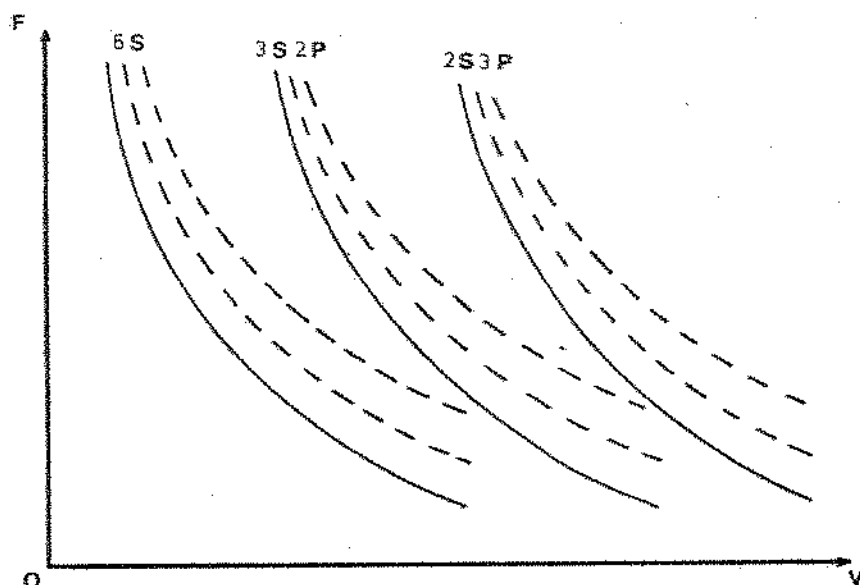


Figura 2.25

Assim, dependendo do número de motores e consequentes acoplamentos, consegue-se preencher grande parte do plano $F(V)$, restando apenas o espaço compreendido até o 1º acoplamento e a velocidade zero, ou seja, a partida.

O problema é resolvido, inserindo-se um reostato de partida, pois se os motores fossem alimentados sob tensão total para iniciar a marcha do trem, haveria uma solicitação tão violenta que os motores não suportariam.

Finalmente deve-se ressaltar o fato de algumas locomotivas disporem no seu circuito de potência, da frenagem elétrica:

- i) frenagem reostática, se os motores funcionando como geradores, descarregam sobre um banco de resistências colocado a bordo.
- ii) frenagem por recuperação, se os motores funcionando como geradores, devolvem energia para a rede elétrica.

Além disso, dentro de uma locomotiva existem máquinas para executar funções auxiliares, e que

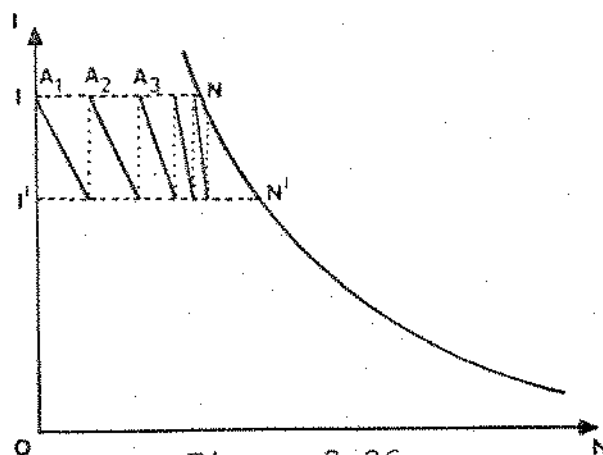


Figura 2.26

Equacionando este desenvolvimento e considerando que para uma resistência externa R_i e uma dada corrente I :

$$E_i(I) = \frac{N_i}{N} E(I) \quad (2.9)$$

obtem-se para qualquer ponto A_i :

$$U - (r + R_i)I = \frac{N_i}{N} (U - rI) \quad (2.10)$$

Transladando para o plano $F(V)$:

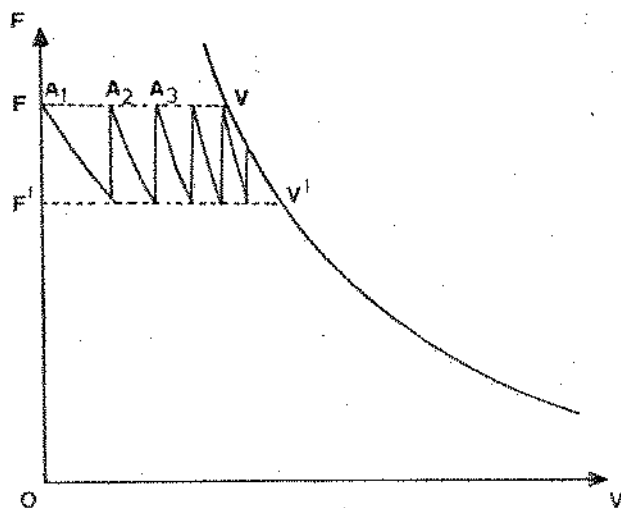


Figura 2.27

Portanto até esta fase do raciocínio, o trem já se encontra em movimento, sendo que os motores da locomotiva estão a campo pleno.

A etapa seguinte compreende a redução do campo para aumentar a zona de atuação no plano $F(V)$. Esta diminuição se processa gradualmente, até que a

condição de campo mínimo indique a mudança na combinação dos motores. Para se passar de uma combinação a outra, faz-se necessário reinserir resistências no circuito dos motores, pois caso contrário haverá uma solicitação inadmissível de corrente.

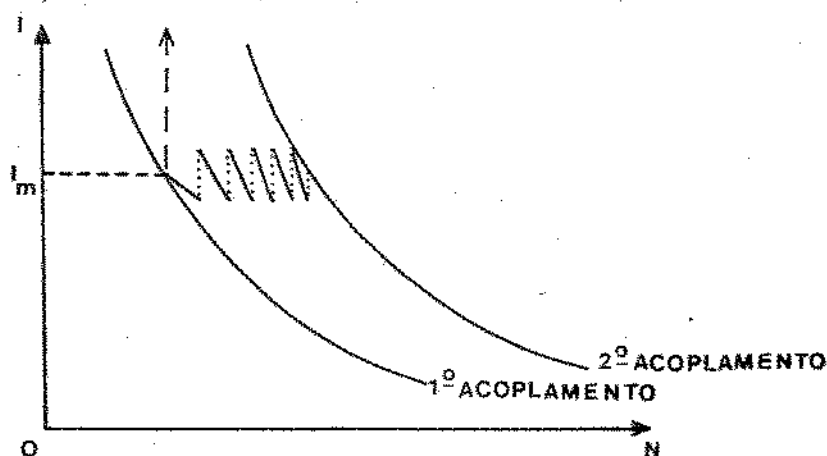


Figura 2.28

Transpondo para o plano $F(V)$, verifica-se que a condição desejável é a de se passar pela transição procurando conservar o esforço trator próximo ao solicitado, sem violar as restrições de corrente.

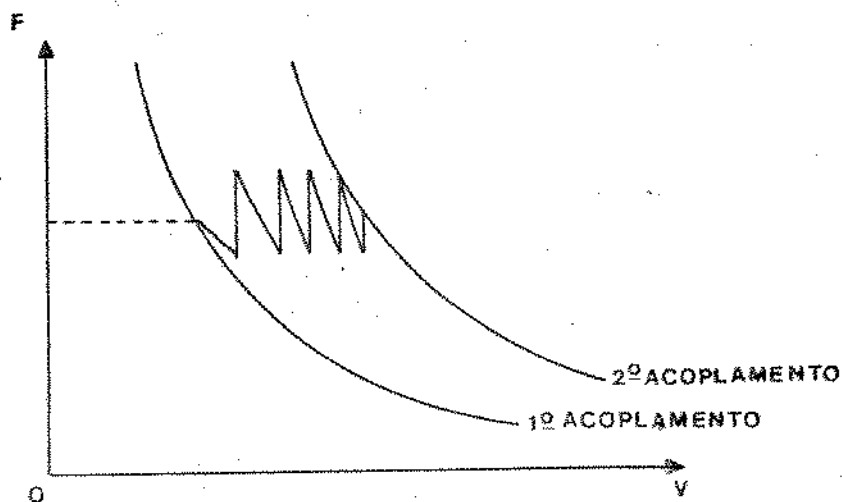


Figura 2.29

E assim toda a fase da aceleração de um trem é desenvolvida, sendo característica de cada fabricante, o modo com que estas operações são efetuadas.

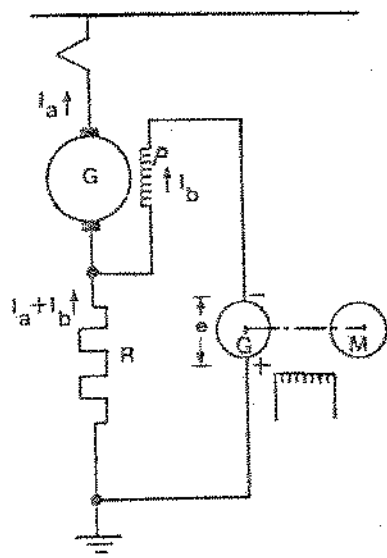
2.5.4 - Frenagem Regenerativa de uma Locomotiva

A frenagem regenerativa ou recuperação, é um processo de frenagem onde ocorre uma conversão de energia mecânica em elétrica, que é devolvida à rede. Este

processo é necessário, pois a frenagem por atrito em velocidades superiores a 50 km/h provoca danos nos rodeiros e reduz consideravelmente a vida das rodas, provocando a fadiga térmica. A frenagem regenerativa na realidade é uma desaceleração eletromecânica com controle de energia, pois os motores de tração trabalhando como geradores, provocam nas rodas da locomotiva um conjugado resistente que se opõe ao movimento da composição, desacelerando desta forma o conjunto.

Na frenagem regenerativa o circuito de potência da locomotiva é arranjado de tal forma que os motores de tração passam a operar como geradores de excitação independente, excitação esta suprida por um grupo motor gerador (conhecido por GMG), composto de um motor de 3000 volts C.C. e um gerador de 75 ou 150 volts, cujas armaduras ou rotores ficam vinculados a um mesmo eixo.

Para uma velocidade do trem, E será constante; como U pode sofrer sensíveis variações, a corrrente recuperada que é proporcional a $E - U$, fica também sujeita a tais variações (idêntico raciocínio se aplica à força F). Portanto, é preciso um Sistema de Estabilização da corrente, para assegurar um esforço de frenagem independente das variações da tensão de linha. Na prática, várias soluções podem ser adaptadas para este sistema, sendo uma das mais usadas a Resistência de Estabilização.



$$e = R(I_a + I_b) + \rho I_b \quad (2.11)$$

$$I_b = \frac{e - RI_a}{R + \rho} \quad (2.12)$$

Figura 2.30

Uma variação da corrente recuperada I_a causa uma variação em sentido contrário da corrente de excitação I_b .

O uso da Recuperação em locomotivas elétricas, operando em linhas duplas, além da função de desacelerar a composição, pode fornecer energia a outra locomotiva que se desloque em sentido contrário, ou mesmo devolver energia para o sistema primário.

2.5.4.1 - Características $F(V)$ de Frenagem Regenerativa

Baseando-se no fato de que I_b diminui quando I_a aumenta, pode-se traçar ponto a ponto a característica efetiva $F(V)$. Tal curva característica (conhecida como Curva Envelope de Frenagem), é formada pelo acoplamento de duas famílias de curvas teóricas $F(V)$, correspondentes respectivamente a :

$$I_b = \text{constante e}$$

$$I_a = \text{constante}$$

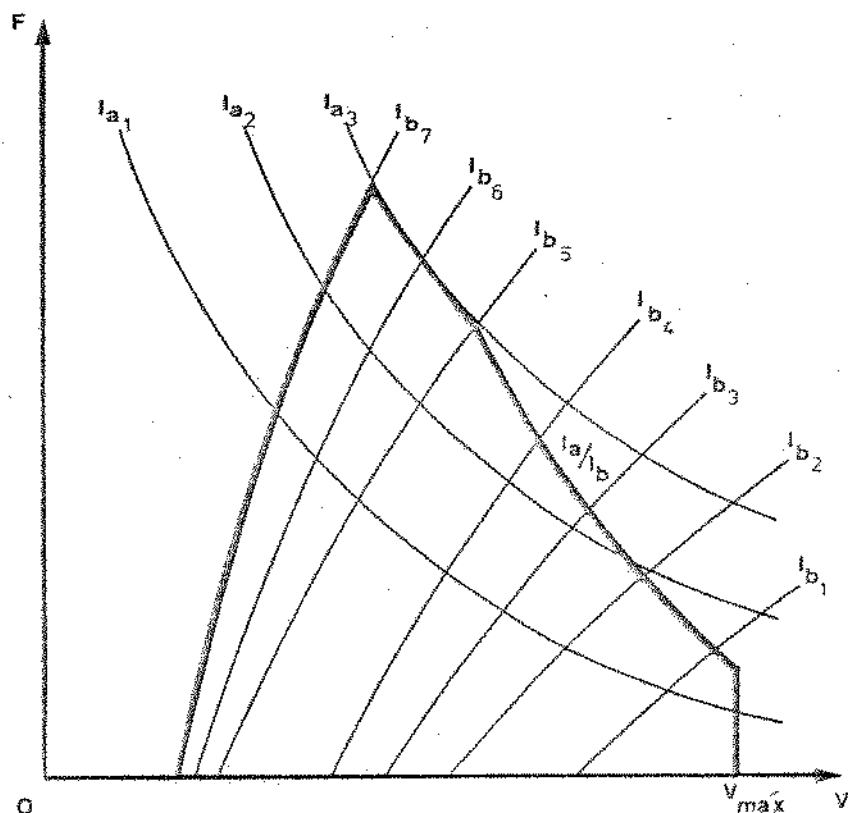


Figura 2.31

Entretanto, conforme se pode constatar da figura 2.31, o domínio utilizável é limitado por:

- velocidade máxima
- intensidade I_b máxima no indutor
- intensidade I_a máxima no induzido
- valor máximo da relação $\frac{I_a}{I_b}$ compatível com uma boa comutação

Da mesma forma que a tração, é possível acoplar-se os motores em algumas combinações, aumentando-se assim a região útil do plano $F(V)$ para a frenagem (ver Apêndice c).

CAPÍTULO III

3 - A SIMULAÇÃO DO SISTEMA FERROVIÁRIO

Neste capítulo será mostrado o algoritmo básico, relacionando o esquema operacional ao elétrico, para a simulação do sistema ferroviário.

3.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS

O diagrama de blocos a seguir, representa o algoritmo básico para a simulação do sistema ferroviário.

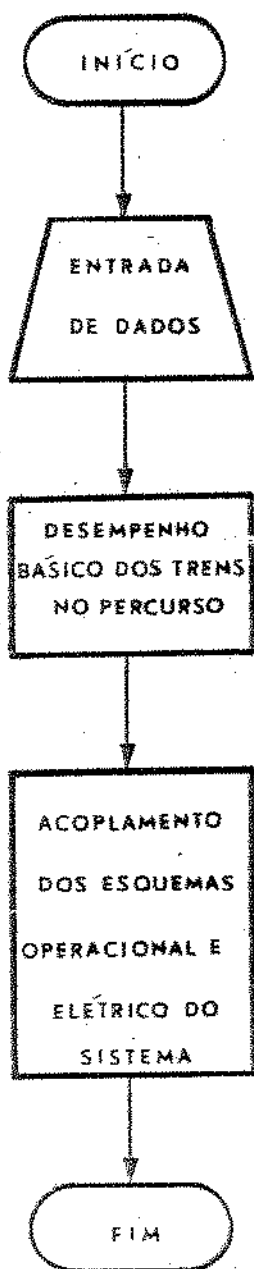


Figura 3.1

Na realidade, este diagrama pode ser aberto em blocos mais detalhados para uma idéia mais clara do método, o que será feito nos itens seguintes.

3.2 - ENTRADA DE DADOS

Esta fase do algoritmo compreende as entradas relativas aos esquemas operacional e elétrico do sistema.

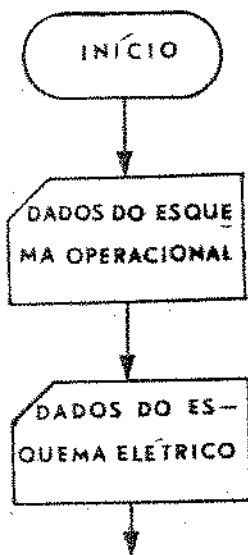


Figura 3.2

DADOS RELATIVOS AO ESQUEMA OPERACIONAL:

- i) hora inicial da simulação
- ii) tempo de simulação
- iii) incremento de tempo
- vi) número de despachos
- v) horário dos despachos
- vi) nome do trem
- vii) sentido da viagem
- viii) quilometro inicial
- ix) distância a ser percorrida
- x) tipo de trem
- xi) tipo de percurso
- xii) espaçamento mínimo entre trens consecutivos

DADOS RELATIVOS AO ESQUEMA ELÉTRICO:

- i) número de sub-estações
- ii) tipo de retificadores
- iii) tipo de transformadores
- iv) potência nominal
- v) relações AT/BT
- vi) impedância
- vii) tipo de ligações e aterramento
- viii) regulações para tração e recuperação
- ix) distâncias desde o marco zero
- x) especificações para convergência e tolerância
- xi) impedância série entre sub-estações adjacentes

3.3 - DESEMPENHO BÁSICO DOS TRENS NO PERCURSO

Esta fase do algoritmo executa o desempenho básico dos trens no perfil compensado, sujeito às restrições de velocidade impostas pelas características da via.

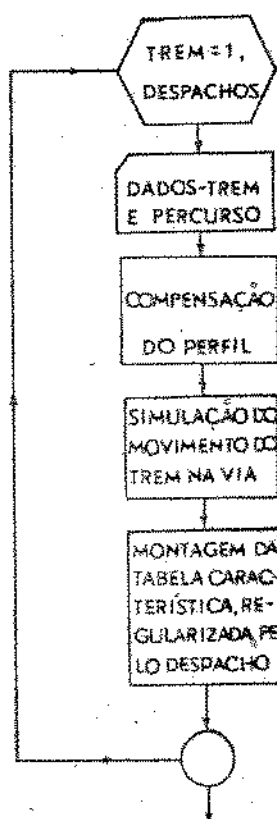
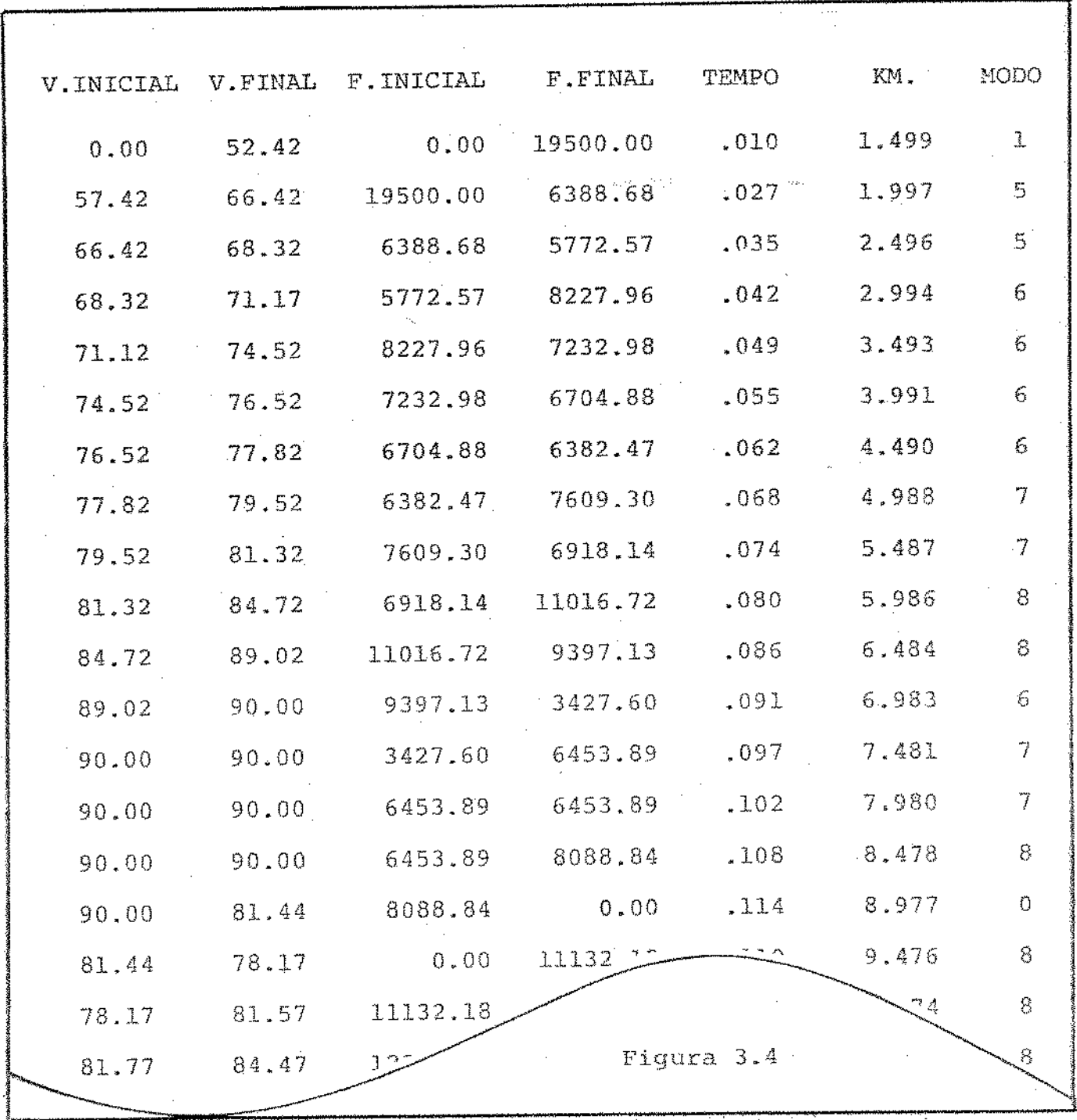


Figura 3.3

Conhecidas as características de cada trem e o tipo de percurso a ser percorrido, há a necessidade de se compensar adequadamente o perfil, para representar a via de forma a proximada. O modo de se realizar esta compensação será explicado com detalhes no capítulo IV.

Dispondo do perfil compensado e dos limites de velocidade para cada trecho discretizado, realiza-se individualmente o movimento dos trens, obtendo-se as especificações de velocidade, tempo, distância, força e modo de operação, conforme mostra a figura 3.4 . As explicações para o método do desempenho básico do trem, serão elucidados com detalhes no capítulo IV.



Obtidas todas as especificações, a etapa seguinte consiste em formar tabelas características para cada trem, regularizadas pelos respectivos horários de despacho.

3.4 - ACOPLAMENTO DO ESQUEMA OPERACIONAL AO ESQUEMA ELÉTRICO DO SISTEMA

Esta fase do algoritmo acopla todo esquema operacional apresentado, às características elétricas do sistema, constituindo a parte vital da simulação. O diagrama de blocos a seguir ilustra todo o procedimento.

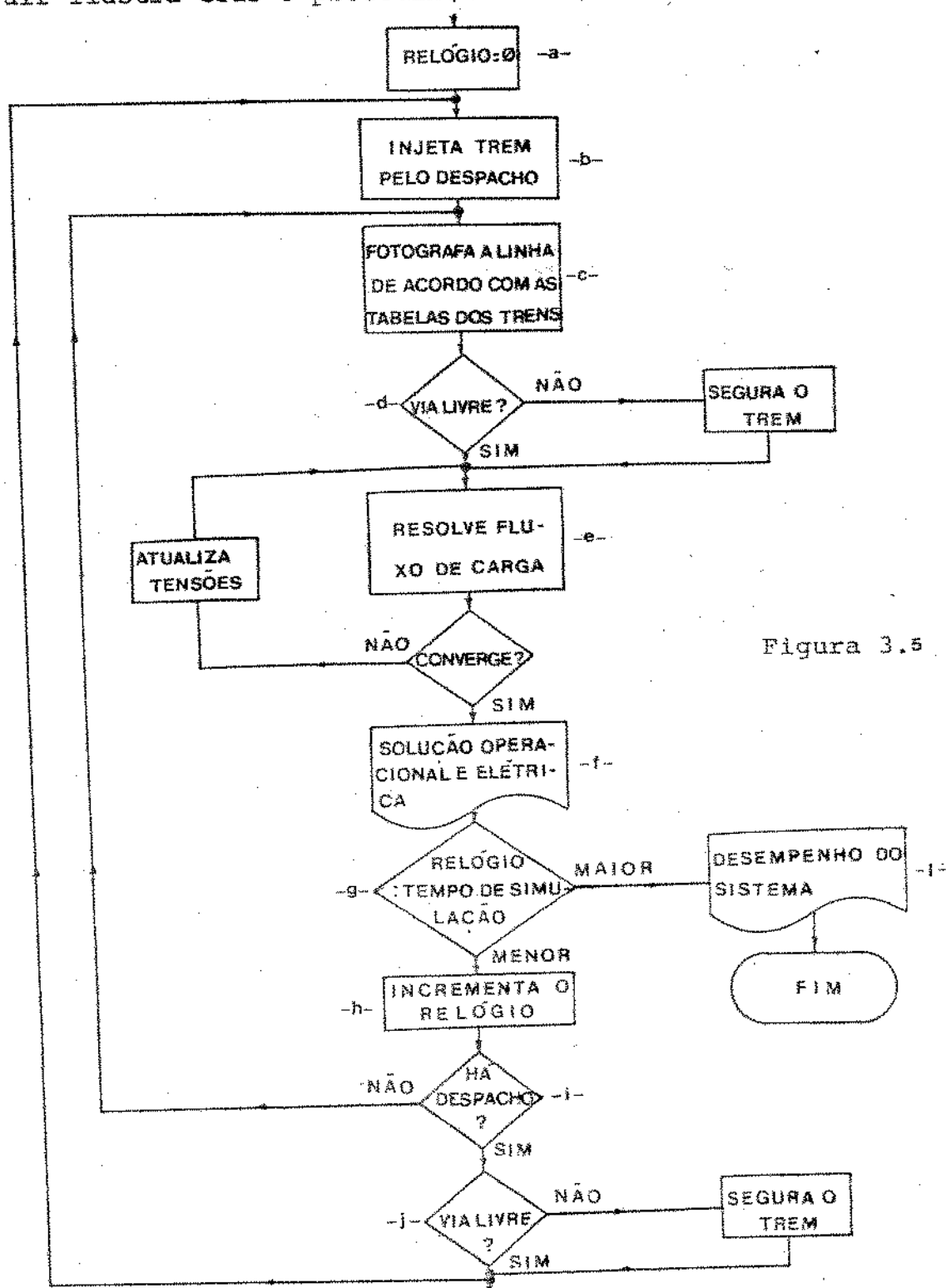


Figura 3.5

3.4.1 - A Lógica da Movimentação dos Trens

(a) Inicialmente evidencia-se a necessidade de um relógio para o controle do tempo de simulação. Desta forma, a movimentação e os despachos dos trens, serão controlados por esta variável.

(b) Este bloco comanda as injeções dos trens de acordo com os horários de despacho, pré - fixados pelos dados de entrada.

(c) A seguir, uma sub-rotina fotografa a linha comparando o relógio de simulação com os tempos especificados nas tabelas características dos trens. Destas tabelas obtém-se as informações relativas de distância, velocidade e modo de operação para cada trem que estiver no sistema.

(d) Entretanto não se pode assegurar a validade destes valores, sem que uma rotina de verificação de via livre seja satisfeita. Esta condição é necessária uma vez que a linha pode ser singela, e a sua liberação somente é verificada se não houver nenhum trem entre estações consecutivas. Se o trecho estiver ocupado, a rotina altera a tabela dos tempos até que a condição de via livre seja satisfeita.

(e) Obtida a validade dos valores do bloco (c), uma outra sub-rotina fornece de acordo com os modos de operação, velocidades e tensões, as correntes absorvidas ou regeneradas pelos trens. Com estes valores, recorre-se a um outro algoritmo que calcula as quedas de tensão nos elementos eletricamente ativos do sistema.

Se entre passos consecutivos não se atingir a tolerância especificada para a convergência, atualiza-se as tensões e o procedimento deste item é reiniciado até que a convergência seja alcançada. No capítulo V será explicado teoricamente todo o desenvolvimento do processo. Prevê-se ainda algumas situações especiais para os casos de restrições de tensão mínima, tensão máxima, correntes de tração e recupe

ração nas sub-estações, aderência e sobrecorrentes nos motores de tração.

(f) Determinados os parâmetros básicos do sistema ferroviário, são impressas as soluções operacionais e elétricas do sistema, para o instante considerado.

(g) A seguir, um teste comparativo com o tempo de simulação é realizado, para se verificar o final da execução.

(h) Se o relógio não atingir o tempo de simulação especificado, o algoritmo incrementa-o para um instante seguinte.

(i) Para este novo instante, há necessidade da verificação de um novo despacho. Caso não ocorra, o processo retorna ao item (c) normalmente.

(j) Mas se o relógio indicar uma nova saída de trens, outra sub-rotina de liberação da via precisa ser testada. Se o trecho estiver ocupado, os tempos da tabela característica serão incrementados com esperas, até que seja possível o despacho do trem. Sendo permitida a saída, o algoritmo retorna ao item (b) para continuar a execução.

(l) Este bloco final é alcançado quando o tempo de simulação estiver esgotado, e então o algoritmo relata saídas sobre o desempenho operacional e elétrico do sistema.

CAPÍTULO IV

4 - A SIMULAÇÃO ELETRO-MECÂNICA

Neste capítulo será desenvolvida a simulação eletro mecânica do movimento do trem, a partir de pré-simuladores do perfil da via, do equipamento elétrico e do material rodante.

4.1 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL RODANTE E DO EQUIPAMENTO ELÉTRICO

A programação de uma viagem inicia-se com a definição do tipo ou padrão do material rodante, visando satisfazer as condições impostas pela viabilidade econômica e pelos requisitos de tráfego. Portanto, é necessário saber as características de todos os elementos que formarão a composição que circulará na viagem. Conhecendo-se o peso a ser rebocado, o tempo estipulado do origem/destino, a velocidade comercial e as condições plani-altimétricas do percurso, seleciona-se adequadamente o elemento trator com o seu respectivo equipamento elétrico, necessário para vencer todas as situações apresentadas durante a viagem.

4.1.1 - Material Rodante

Como foi frisado anteriormente, o material rodante deve obedecer às condições impostas pela viagem. Para o caso, será uma composição ferroviária de grandes distâncias, com um número especificado de vagões (carga) ou carros (passageiros). Portanto, sabendo-se quais e quantos elementos formarão o trem, torna-se necessário conhecer as características dos elementos rebocados, para se especificar o elemento trator:

- i) peso de cada tipo de carro/vagão
- ii) número de truques, ou eixos, por carro/vagão
- iii) área frontal de cada tipo de carro/vagão
- iv) comprimento de cada tipo de carro/vagão
- v) número de carros/vagões

Desta forma, o tipo e peso a ser rebocado fica determinado, faltando apenas a escolha da locomotiva; então

- i) peso total

- ii) peso aderente
- iii) número de eixos ou truques motores
- iv) disposição dos eixos
- v) área frontal
- vi) comprimento

definem as características básicas da locomotiva, como elemento do material rodante.

4.1.2 - Equipamento Elétrico

Para esta simulação, a principal característica do equipamento elétrico consiste da curva $C(N)$, ou efetivamente $F(V)$, fixada uma certa tensão de linha (U). Utilizando-se a curva fornecida pelo fabricante da locomotiva, ou mesmo a curva de saturação do motor (ver Apêndice C), adequa-se uma equação matemática pré-fixada às tais características (ver Apêndice B).

4.2 - CARACTERÍSTICAS DOS PERFIS

Dentro das idéias que compõe esta simulação, as características da via, influenciam decisivamente no comportamento eletro-mecânico do trem. Como a representação do perfil em sua totalidade é impossível, torna-se necessário representá-lo discretizado, usando-se para isto uma divisão em trechos conforme a situação real se apresente. Estes trechos deverão compreender as estações ou marcos existentes na via, caracterizando os possíveis pontos de parada ou as diferenças de cotas.

DADOS INICIAIS DE CADA TRECHO:

- i) estação ou marco
- ii) quilometro
- iii) altitude
- iv) velocidade
- v) se é ou não ponto de parada
- vi) tempo de parada

DADOS CARACTERÍSTICOS DO TRECHO:

- i) quilometro inicial
- ii) quilometro final
- iii) altitude inicial
- iv) altitude final
- v) velocidade máxima
- vi) quilometros em que se encontram as curvas
- vii) raios e ângulos das curvas
- viii) velocidade máxima nas curvas
- ix) restrições de velocidade para túneis, pontes e obras
- x) quilometro inicial
- xi) quilometro final

Com todos estes itens, pode-se ter uma idéia, discretizada, do perfil da via.

4.3 - ACOPLAMENTO DINÂMICO DO TREM COM A VIA

Desde o instante em que um trem inicia seu movimento, fica sujeito a forças que se opõe a seu desenvolvimento. O esforço resistente a um comboio (locomotiva + material rebocado) pode ser decomposto em:

- resistências que no perfil se opõe ao movimento do trem (resistência ao avanço)
- resistências suplementares devido às curvas
- resistências devido à gravidade (positivas em rampas ascendentes, negativas nas descendentes)

4.3.1 - Resistência ao avanço

Os diversos tipos de resistência que se opõe ao movimento, podem ser separadas em duas categorias que não obedecem às mesmas leis de variação, em função da velocidade:

- i) resistências devido ao rolamento e a todo atrito mecânico que acompanha

panha o movimento do trem (dependem das características do material rodante: cargas por eixo, número de eixos, tipo de truque, etc).

- ii) resistência aerodinâmica sobre a superfície frontal e o atrito nas faces laterais (uma função quadrática da velocidade).

4.3.2 - Resistência devido às curvas

Admite-se (3) para todos os tipos de material rodante, uma resistência específica de:

$$r_c = \frac{500 \times b}{r} \quad (\text{kg/ton}) \quad (4.1)$$

onde b - bitola em metros

r - raio em metros

4.3.3 - Resistência devido à gravidade

Um trem sujeito à ação da gravidade, tem sua componente na direção do movimento dada por:

$$W_h = \frac{W \cdot i}{1000} \quad (\text{ton.}) \quad (4.2)$$

onde i - inclinação em ‰

Portanto a resistência específica à gravidade:

$$r_g = i \quad (\text{kg/ton}) \quad (4.3)$$

4.4 - A EQUAÇÃO DINÂMICA

A energia total fornecida a um trem elétrico para sua propulsão pode ser dividida em partes:

- i) acelerar o trem em uma direção horizontal
- ii) acelerar as partes rotativas
- iii) realizar trabalho contra a gravidade
- iv) realizar trabalho contra as resistências ao movimento
- v) suprir as perdas nos motores e equipamentos elétricos

Para pequenas distâncias em nível a grandes velocidades, a energia necessária para aceleração forma a grande porcentagem da energia total para a propulsão. Por outro lado, para grandes distâncias em nível a grandes velocidades, a energia necessária para vencer as resistências ao movimento pode ser considerada maior que a necessária para a aceleração. A determinação de energia necessária para aceleração e também para os outros itens acima (exceto as perdas no motor), envolvem apenas as leis elementares da dinâmica. O trabalho realizado durante o período de aceleração uniforme desde o repouso, o trabalho contra a gravidade e a energia gasta para vencer as resistências ao movimento, podem ser todos diretamente determinados de simples expressões quando fatores variáveis não estão envolvidos. Mas com aceleração e resistências ao movimento variáveis, os trabalhos realizados devem ser calculados por um método ponto a ponto, isto é, através de uma integração numérica.

4.4.1 - As Equações do Movimento

Considere-se um conjunto de N trens movimentando-se em um determinado perfil. Seja k ($k = 1, 2, \dots, N$) o índice descritivo de uma composição qualquer na via. Define-se então:

$x_k(t)$ - a posição do k -ésimo trem no instante t .

$y_k(t)$ - a velocidade do k -ésimo trem no instante t .

$f_k(t)$ - força aplicada ao k -ésimo trem no instante t .

m_k - a massa (suposta constante) do k-ésimo trem.

$g_k[y_k(t)]$ - a força resistente ao avanço, atuando sobre o k-ésimo trem no instante t.

$h_k[x_k(t)]$ - a força resistente (ou acelerante) devido ao perfil, atuando sobre o k-ésimo trem no instante t.

Usando esta notação, o movimento de um trem k qualquer pode ser descrito pelo sistema de equações diferenciais:

$$\frac{d}{dt} [x_k(t)] = y_k(t) \quad (4.4)$$

$$m_k \cdot \frac{d}{dt} [y_k(t)] = -g_k[y_k(t)] - h_k[x_k(t)] + f_k(t) \quad (4.5)$$

para $k = 1, 2, \dots, N$

4.4.2 - A Solução Numérica (10)

O sistema de equações diferenciais formado por (4.4) e (4.5), pode também ser descrito por:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d[y_k(t)]}{d[x_k(t)]} &= \frac{1}{m_k \cdot y_k(t)} \left\{ -g_k[y_k(t)] - h_k[x_k(t)] + f_k(t) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

para $k = 1, 2, \dots, N$

que representa uma equação diferencial de primeira ordem, e que pode ser resolvida usando-se qualquer método numérico conhecido.

Utilizando-se o método Runge - Kutta de segunda ordem:

$$y_k(t+\Delta t) = y_k(t) + \frac{1}{2} (K_1 + K_2) \quad (4.7)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

onde

$$K_1 = S \cdot \frac{1}{m_k \cdot y_k(t)} \cdot \left\{ -g_k[y_k(t)] - h_k[x_k(t)] + f_k(t) \right\} \quad (4.8)$$

$$K_2 = S \cdot \frac{1}{m_k \cdot [y_k(t) + K_1]} \cdot \left\{ -g_k[y_k(t) + K_1] - h_k[x_k(t) + S] + f_k(t) \right\} \quad (4.9)$$

S - incremento no espaço (mesmo valor que a discretização imposta no item 4.2).

Desenvolvendo-se o método passo a passo:

i) Partindo-se com os valores iniciais de

$$x_k^i, y_k^i \text{ e } t^i;$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

ii) a próxima posição dos trens:

$$x_k^{(i+1)} = x_k^i + S ; \quad (4.10)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

iii) as velocidades obtidas de (4.7):

$$y_k^{(i+1)} = y_k^i + \frac{1}{2} (K_1 + K_2) ;$$

$$k = 1, 2, \dots, N \quad (4.11)$$

iv) e os tempos necessários para alcançar as novas posições:

$$\Delta t_k = \frac{2.S}{y_k^i + y_k^{(i+1)}} ; \quad (4.12)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

$$t_k^{(i+1)} = t_k^i + \Delta t_k ; \quad (4.13)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

4.4.3 - A Função Velocidade-Deslocamento

Supondo-se um trem qualquer deslocando-se entre duas estações A e B, consecutivas, e separadas por uma distância L :

1 - Partindo-se da estação A : $x_k^1 = y_k^1 = t_k^1 = 0$

Usando-se o método determinam-se os valores x_k^i , y_k^i , t_k^i para o trem se movendo no sentido da próxima estação B (Runge - Kutta "forward").

2 - Partindo-se da estação B : $x_k^{1*} = L$, $y_k^{1*} = 0$

e $t_k^{1*} = T$ (tempo especificado para a viagem).

Usando-se o método determinam-se os valores x_k^{j*} , y_k^{j*} , t_k^{j*} para o trem se movendo no sentido contrário, ou seja, com os freios aplicados (Runge-Kutta "backward").

- 3 - Calculando-se os dois conjuntos de valores x_k^i , y_k^i , t_k^i e x_k^{j*} , y_k^{j*} , t_k^{j*} simultaneamente, determina-se o ponto de intersecção das curvas quando:

$$x_k^m > x_k^{n*}$$

$$y_k \left[x_k^{n*} \right] > y_k^{n*}$$

$$y_k \left[x_k^{(n-1)*} \right] < y_k^{(n-1)*}$$

- 4 - Como eventualmente frenagem elétrica, frenagem aerodinâmica e restrições de velocidade podem ser utilizadas, uma outra rotina "backward" se desenvolve paralelamente ao processo para satisfazer estas condições.

- 5 - Terminados todos os passos do algoritmo, obtem-se para cada seção entre estações, e para cada trem, um conjunto de valores característicos (ver apêndice D).

A figura 4.1 mostra as curvas características velocidade-tempo e deslocamento-tempo entre duas estações consecutivas, para um determinado trem:

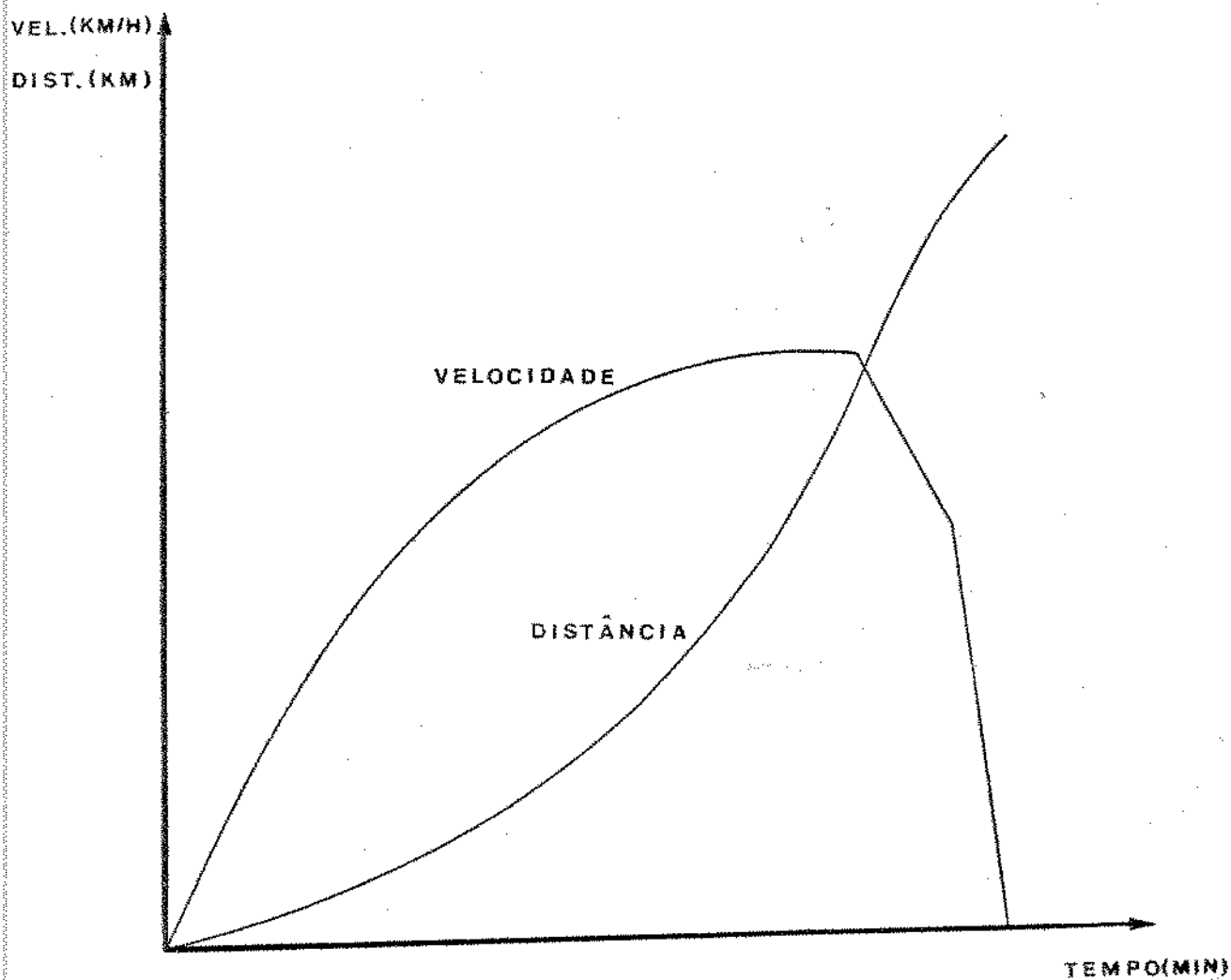


Figura 4.1

CAPÍTULO V

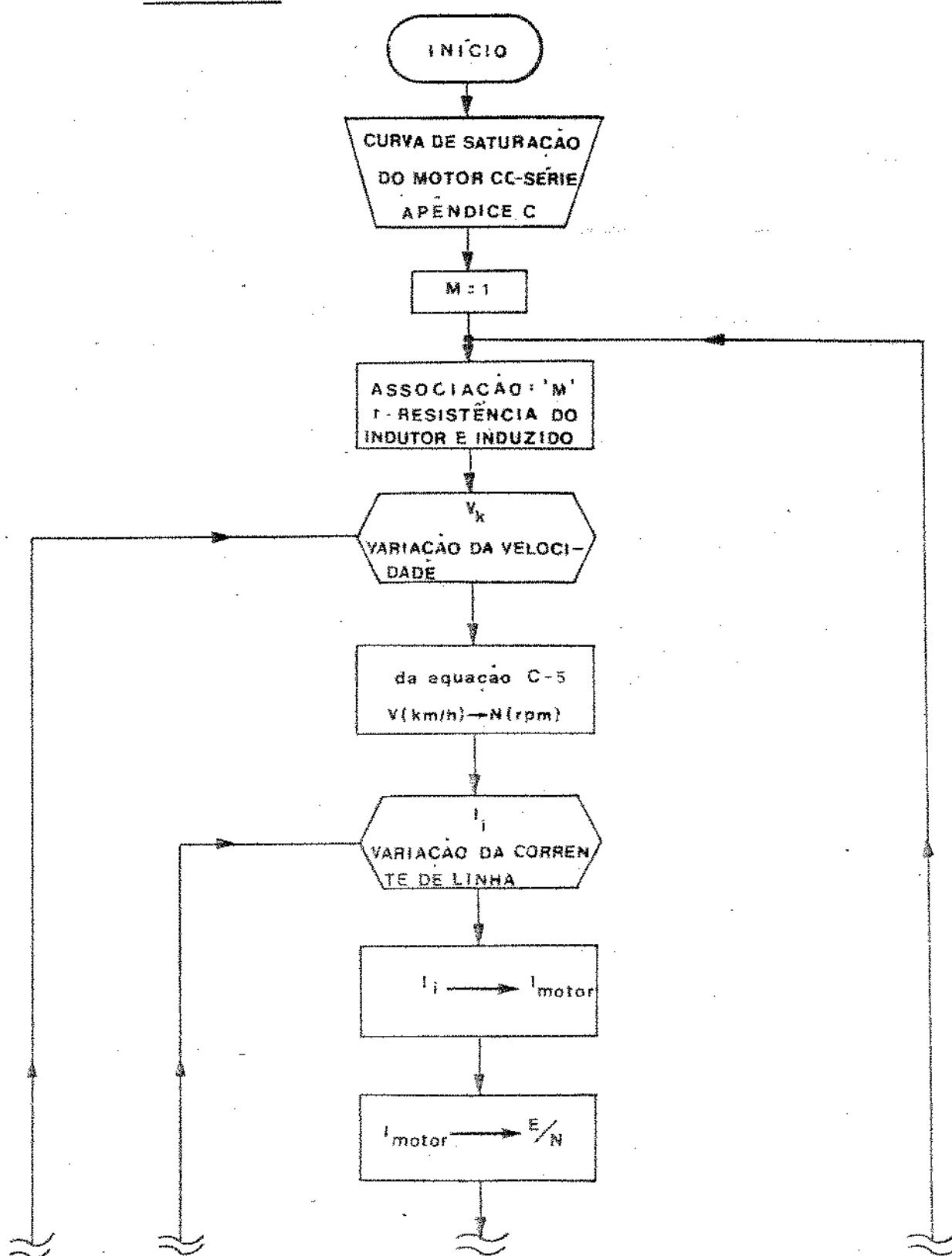
5 - O FLUXO DE CARGA

Neste Capítulo será mostrado o algoritmo básico para o cálculo do fluxo de carga, relacionando as equações terminais da locomotiva com as equações do sistema eletrificado, através de um método iterativo Newton-Raphson.

5.1 - A EQUAÇÃO TERMINAL DA LOCOMOTIVA

Uma locomotiva equipada com motores C.C. tipo série, pode ser representada por uma equação terminal que reuna as características de utilização dos motores. Na realidade, tal representação é uma família de equações não lineares, baseada nas curvas de saturação dos motores, quando estes estiverem associados e diretamente alimentados pela tensão de linha

5.1.1 - O Algoritmo para a Determinação das Características Terminais



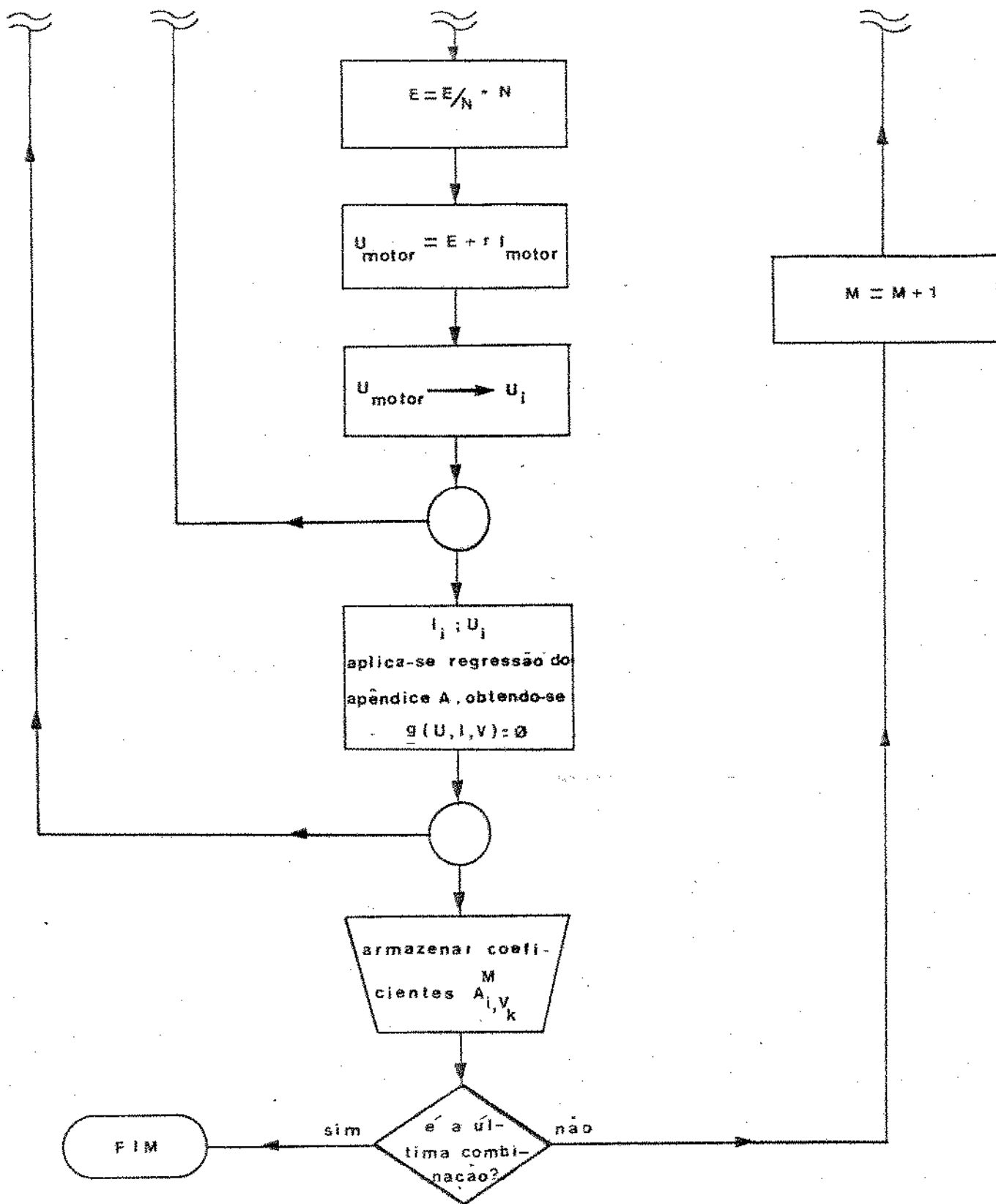


Figura 5.1

A família de equações não lineares, represen-
tativas de uma locomotiva, se formaliza como:

$$g_M(U, I, v) = 0 \quad (5.1)$$

onde:

- U - tensão da linha de contato (volts)
- I - corrente da linha de contato (ampêres)
- v - velocidade da locomotiva (km/h)
- M - associação dos motores (modo de operação)

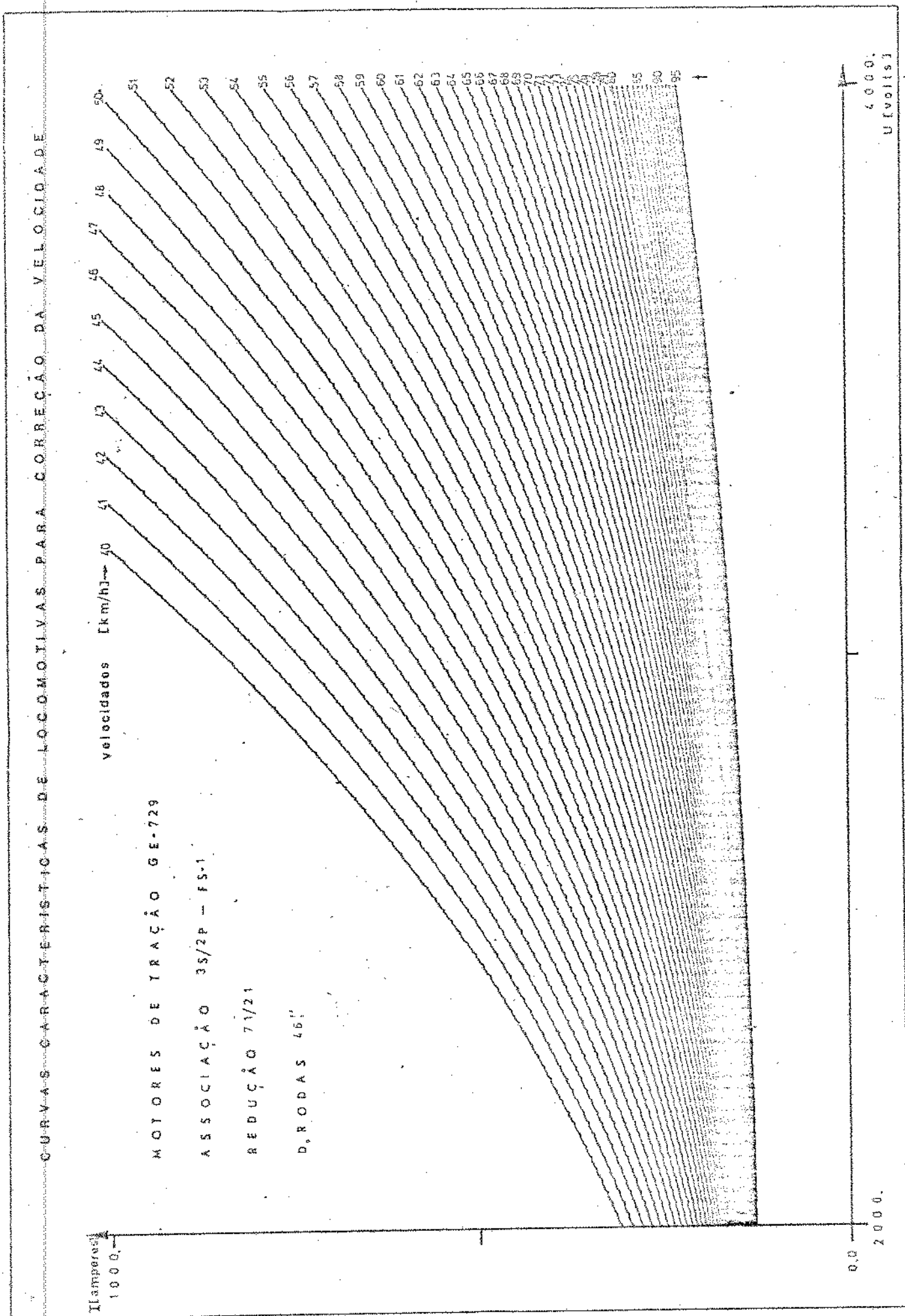


Figura 5.2

5.1.2 - A Forma das Equações não lineares

As curvas obtidas no ítem anterior são variações da curva de saturação dos motores para diferentes velocidades de referência e transladadas para os terminais da locomotiva. Assim, adequando - se o mesmo tipo de equação, obtem-se:

$$I = A_{0,v_k}^M + A_{1,v_k}^M \cdot U + A_{2,v_k}^M \cdot U^2 + A_{3,v_k}^M \cdot U^3 \quad (5.2)$$

onde A_{i,v_k}^M são os coeficientes da equação características de uma locomotiva para uma certa velocidade (v_k) especificada, e uma determinada associação ou modo de operação (M).

5.2 - AS EQUAÇÕES DO SISTEMA ELETRIFICADO

Considere-se um exemplo da parte C.C. de um sistema ferroviário eletrificado:

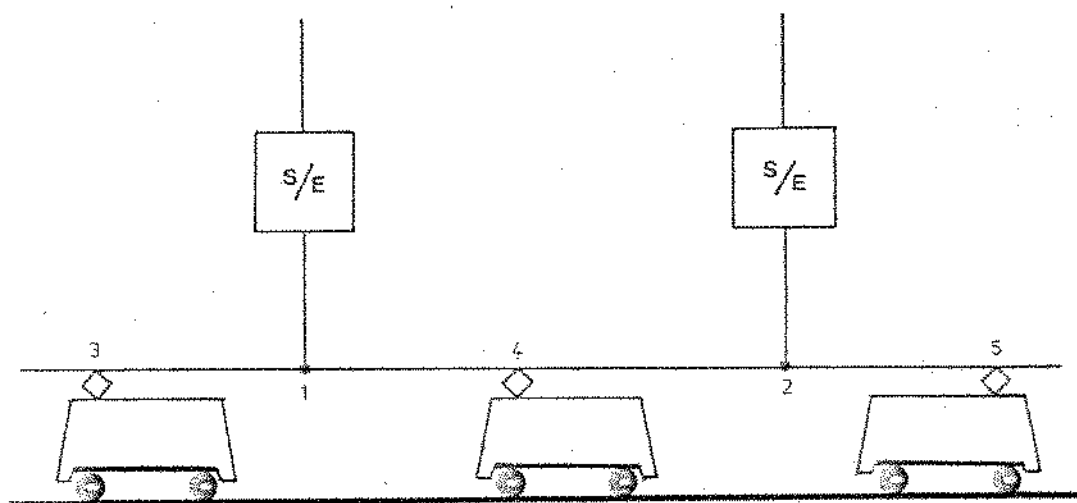


Figura 5.3

Representando-se as sub-estações como barras de tenção controlada, e os trens como barras de carga:

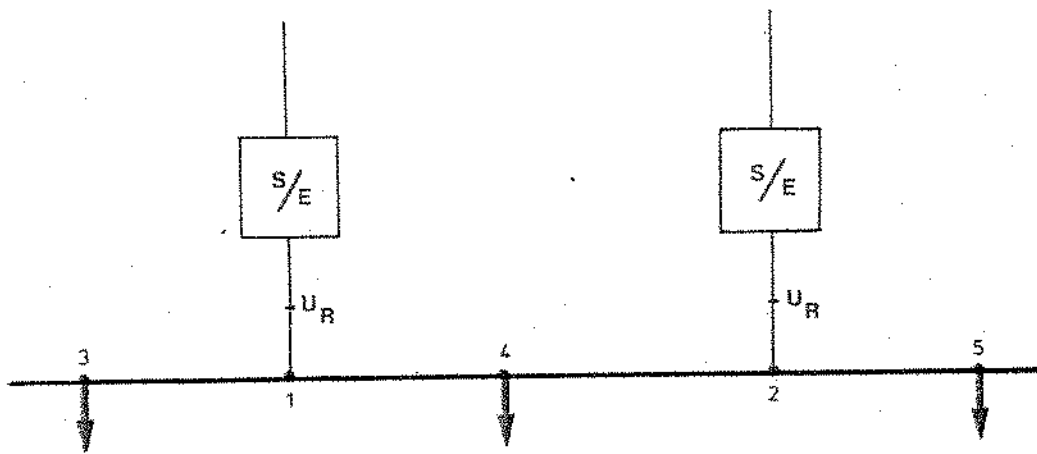


Figura 5.4

Mudando-se a referência para a terra

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_R - \underline{U} \quad (5.3)$$

e representando-se as admitâncias:

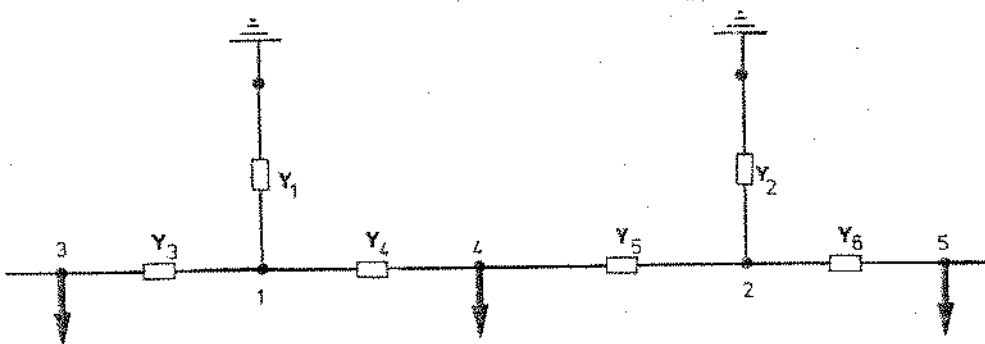


Figura 5.5

Usando-se a representação através da matriz admittance nodal, tem-se:

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \Delta \underline{U} \quad (5.4)$$

onde

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} ; \text{ vetor de correntes}$$

$$\Delta \underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} ; \text{ vetor de quedas de tensão}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad ; \text{ matriz admitância das barras}$$

5.3 - O MÉTODO ITERATIVO NEWTON - RAPHSON (5)

Dado um conjunto de equações não lineares,

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (5.5)$$

e as estimativas do vetor solução,

$$x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} \quad (5.6)$$

Supondo que:

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} + \Delta x_1 \\ x_2^{(0)} + \Delta x_2 \\ \dots\dots\dots \\ x_n^{(0)} + \Delta x_n \end{aligned} \quad (5.7)$$

sejam as soluções do sistema (5.5),

$$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n \quad (5.8)$$

são as correções necessárias para se chegar ao vetor solução, partindo-se das estimativas iniciais, isto é :

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\
 f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Expandindo-se cada equação de (5.9) em série de Taylor, e retendo-se apenas os termos lineares:

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1 \cdot \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 + \Delta x_2 \cdot \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots\dots\dots + \\
 + \Delta x_n \cdot \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 &= y_1 \\
 \\
 f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1 \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 + \Delta x_2 \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots\dots\dots + \\
 + \Delta x_n \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 &= y_2 \\
 \\
 &\dots\dots\dots (5.10) \\
 \\
 f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1 \cdot \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 + \Delta x_2 \cdot \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 + \dots\dots\dots + \\
 + \Delta x_n \cdot \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 &= y_n
 \end{aligned}$$

Colocando-se o sistema na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots\dots\dots \\ y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots\dots\dots \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots\dots\dots \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots\dots\dots \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}$$

$$\underline{E} = \underline{J} \underline{C}
 \tag{5.11}$$

onde

J é o Jacobiano para as funções f_i $i=1, \dots, n$

C é o vetor de correções Δx_i $i=1, \dots, n$

E é o vetor dos erros $y_i - f_i(x_j^{(0)})$ $j=1, \dots, n$

Aplicando-se um método para solução de um sistema de equações algébricas lineares (por exemplo, o desenvolvido no Apêndice B):

$$\underline{C} = J^{-1} \cdot \underline{E} \quad (5.12)$$

e os novos valores de x_i :

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i, \quad i=1, \dots, n \quad (5.13)$$

O processo repete-se iterativamente até que valores consecutivos de x_i satisfaçam uma tolerância específica da.

5.4 - O ALGORITMO BÁSICO PARA O CÁLCULO DO FLUXO DE CARGA

Vamos inicialmente supor um determinado trem p e sua respectiva locomotiva, a uma velocidade v_k . A equação terminal é :

$$I_p = A_{0,v_k}^M + A_{1,v_k}^M \cdot U_p + A_{2,v_k}^M \cdot U_p^2 + A_{3,v_k}^M \cdot U_p^3 \quad (5.14)$$

Mudando-se a referência para a terra e chamando

$$\underline{V} = \underline{\Delta U} \quad (\text{vetor das quedas de tensão}): \quad (5.15)$$

$$I_p = A_{0,v_k}^M + A_{1,v_k}^M \cdot V_p + A_{2,v_k}^M \cdot V_p^2 + A_{3,v_k}^M \cdot V_p^3 \quad (5.16)$$

Das equações (5.4) e (5.15), tem-se :

$$\underline{I} = Y \underline{V} \quad (5.17)$$

Relacionando-se todas as barras do sistema eletrificado representado por (5.17), com o trem p :

$$I_p(V_p) = \sum_{q=1}^n (Y_{pq} \cdot V_q) \quad (5.18)$$

n = nº de barras do sistema

ou seja

$$I_p(V_p) - \sum_{q=1}^n (Y_{pq} \cdot V_q) = 0 \quad (5.19)$$

Definindo-se:

$$\begin{aligned} I_1(V_1) - \sum_{q=1}^n (Y_{1q} \cdot V_q) &= e_1 \\ I_2(V_2) - \sum_{q=1}^n (Y_{2q} \cdot V_q) &= e_2 \\ &\dots\dots\dots \\ I_K(V_K) - \sum_{q=1}^n (Y_{Kq} \cdot V_q) &= e_K \end{aligned} \quad (5.20)$$

chega-se ao mesmo tipo de sistema que o descrito em (5.5).

O Jacobiano do sistema (5.20) é determinado por:

i) elementos fora da diagonal $\left(\frac{\partial e_k}{\partial V_q} \right) :$

$$J_{Kq} = - Y_{Kq}, \quad q=1, \dots, n \quad (5.21)$$

ii) elementos da diagonal $\left(\frac{\partial e_k}{\partial V_k} \right) :$

$$J_{KK} = A_{1,V_k}^M + 2A_{2,V_k}^M \cdot V_k + 3A_{3,V_k}^M \cdot V_k^2 - Y_{Kk} \quad (5.22)$$

Partindo-se da condição inicial $\underline{V} = 0$, a equação (5.22) se reduz :

$$J_{KK} \approx A_{1,v_k}^M - Y_{KK} \quad (5.23)$$

Portanto, o Jacobiano é a própria matriz Y com sinal trocado, acrescentando-se os elementos A_{1,v_k}^M como derivação.

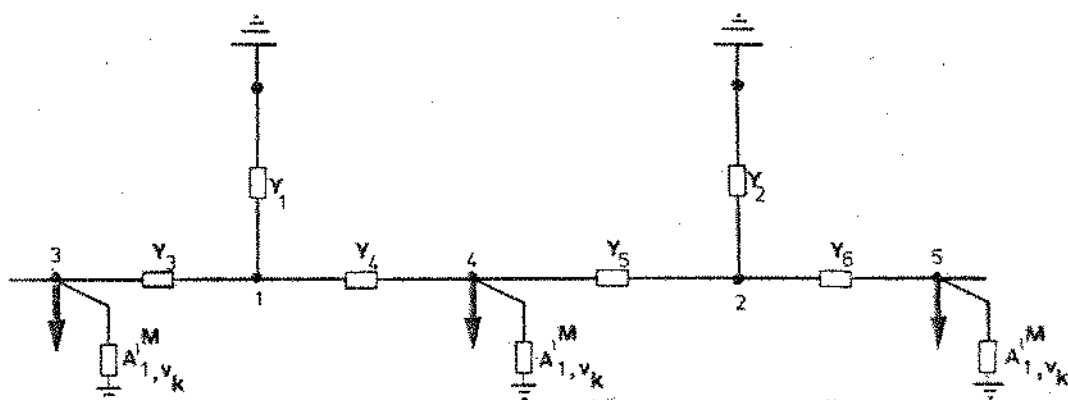


Figura 5.6

Dentro das hipóteses simplificadoras (16), existe ainda a possibilidade de se desprezar os elementos A_{1,v_k}^M , ficando o Jacobiano a própria matriz $-Y$. Além disso, é possível durante o processo iterativo, manter-se a matriz Jacobiana constante e igual àquela inicialmente calculada (método de Von Mises).

A Figura 5.7 ilustra o comportamento dos dois métodos.

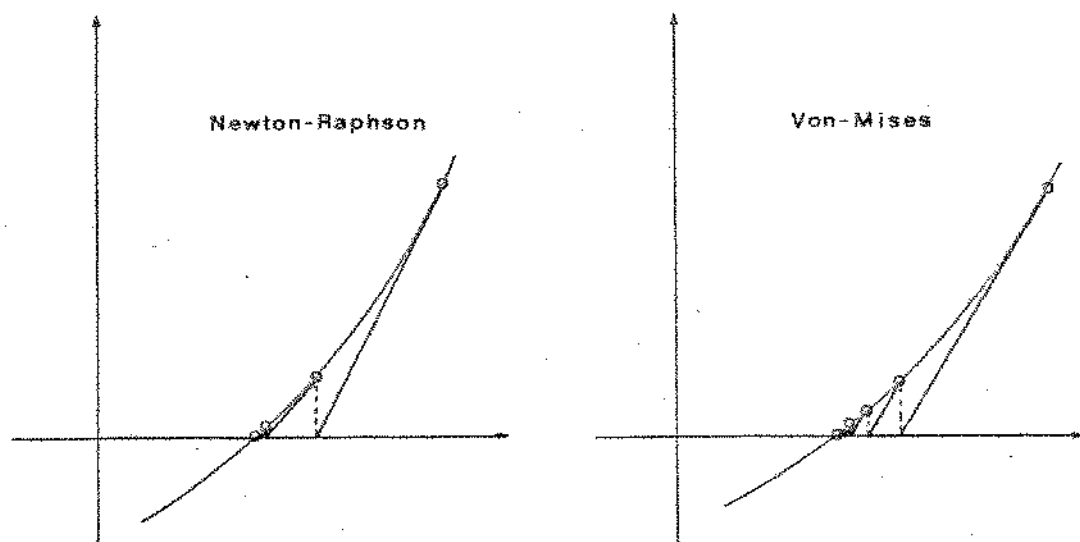


Figura 5.7

Utilizando-se de um algoritmo para a resolução do sistema de equações lineares,

$$\underline{e} = J \cdot \underline{\Delta V} \quad (5.24)$$

obtem-se o vetor solução $\underline{\Delta V}$, e então determinam-se os novos valores de $\underline{V}$:

$$\underline{V}^{(v+1)} = \underline{V}^{(v)} + \underline{\Delta V}$$

A solução é obtida quando a especificação de tolerância, no vetor das quedas de tensão, é alcançada.

CAPÍTULO VI

6 - A APLICAÇÃO PRÁTICA

Neste capítulo será desenvolvido um exemplo de aplicação prática, envolvendo esquemas operacionais, esquemas elétricos e perfis reais. Os dados foram fornecidos pela FERROVIAS PAULISTAS S.A. (FEPASA).

6.1 - DADOS RELATIVOS AO ESQUEMA OPERACIONAL

- i) hora inicial da simulação - 09:00 horas
- ii) tempo de simulação - 3 horas
- iii) incremento de tempo - 3 minutos
- iv) número de despachos - 5 trens
- v) horários dos despachos - 09:00 horas; 09:00 horas e 24:00 minutos; 10:00 horas e 06:00 minutos; 10:00 horas e 24:00 minutos; 11:00 horas e 24:00 minutos.
- vi) nome dos trens - P06; P05; P08; P07; P10
- vii) sentido das viagens - volta; ida; volta; ida; volta.
- viii) quilômetros iniciais - 174.0; 1.0; 174.0; 1.0; 174.0.
- ix) distância a ser percorrida - 173.0 Km.
- x) tipo de trens - passageiros (tipo 1)
- xi) tipo de percurso - exportação; importação; exportação; importação; exportação.
- xii) espaçamento mínimo entre trens consecutivos - 3.0 Km.

6.2 - DADOS RELATIVOS AO ESQUEMA ELÉTRICO

- i) número de sub-estações : 7

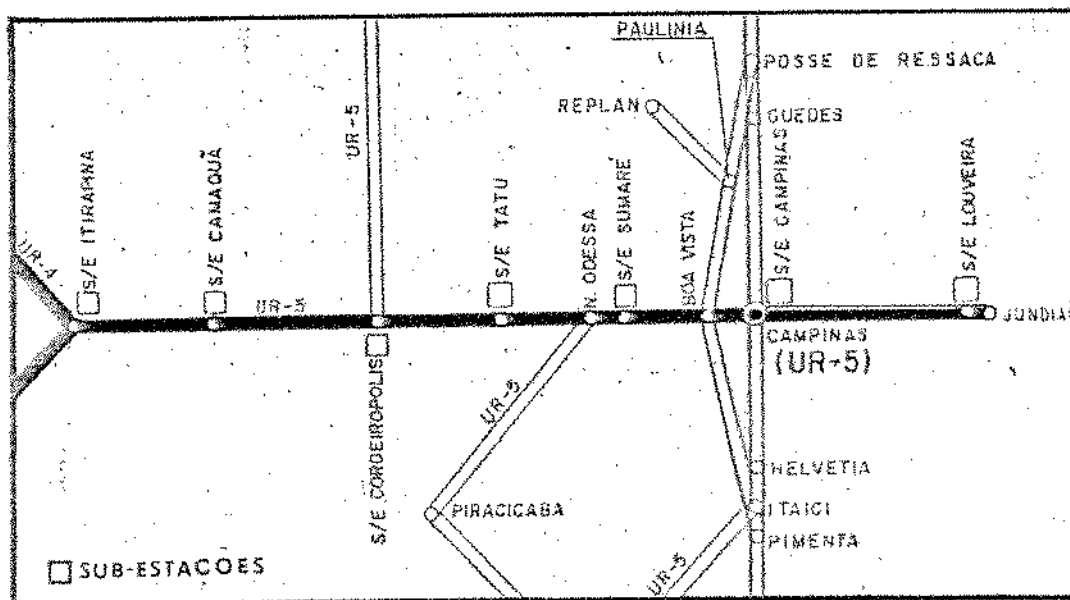


Figura 6.1

- ii) tipo de retificadores - motor-gerador; silício
- iii) tipo de transformadores - a óleo
- iv) potência nominal - ver Figura 6.2
- v) relações AT/BT - ver Figura 6.2
- vi) impedâncias = 0.5 ohms
- vii) tipo de ligações e aterramento - Δ-Y

Figura 6.2

Transformadores trifásicos - 60 CICLOS									
Sub-estações	Quant.	Fabricante	Capacidade em K.V.A.	Voltagem nominal	Resfriamento	Relação	Impedância %	Núm. de des. da placa	Observações
Levanteira	3	C.E.C.	1900	80000/2300 60°C.	A óleo	8.15	8.05	J-E, 2750	
Cametas	1	G.E.C.	3900	88000/2300 60°C.	A óleo	8.05	8.37	J-E, 2717	
Sumaré	2	"	1900	2850	"	8.15	8.05	J-E, 2750	
Cardiopolis	2	"	"	"	"	"	"	"	
Camagui	2	West.C.	2500	3750 60°C.	"	7.6	7.6	J-E, 2679	
Itirapina	2	"	"	"	"	"	"	"	
São Carlos	1	"	"	"	"	"	"	"	
Ouro	2	G.E.C.	1900	2850 60°C.	"	8.15	8.26	J-E, 2719	
Rincão	2	"	1900	"	"	"	"	"	
Espirado	1	West.C.	2500	3750 60°C.	"	7.6	7.50	J-E, 2797	
D. Corrêgos	1	G.E.C.	3900	5350 60°C.	"	8.05	8.37	J-E, 2717	
Pedernais	1	"	"	"	"	"	"	"	
Pratânia	1	"	"	"	"	"	"	"	

Grupo de moto-geradores - Cada grupo consiste de: Motor síncrono trifásico de 60 ciclos conjugado com 2 geradores D.C. ligados em série									
Sub-estações	Quant.	Fabricante	Capacidade em K.V.A.	Voltagem nominal	Resfriamento	Relação	Impedância %	Núm. de des. da placa	Observações
Levanteira	3	G.E.C.	1900	2300 60°C.	A óleo	8.15	8.05	J-E, 2750	
Cametas	1	"	3600	5350 60°C.	"	7.6	7.50	J-E, 2797	
Sumaré	2	"	1900	2850	"	"	"	"	
Cardiopolis	2	"	"	"	"	"	"	"	
Camagui	2	West.C.	2500	3750 60°C.	"	7.6	7.6	J-E, 2679	
Itirapina	2	"	"	"	"	"	"	"	
São Carlos	1	"	"	"	"	"	"	"	
Ouro	2	G.E.C.	1900	2300 60°C.	A óleo	8.15	8.26	J-E, 2719	
Rincão	2	"	1900	"	"	"	"	"	
Espirado	1	West.C.	2500	3750 60°C.	"	7.6	7.50	J-E, 2797	
D. Corrêgos	1	G.E.C.	3900	5350 60°C.	"	8.05	8.37	J-E, 2717	
Pedernais	1	"	"	"	"	"	"	"	
Pratânia	1	"	"	"	"	"	"	"	

viii) regulações	tração	regeneração
S/E LOUVEIRA	2300 A.	750 A.
S/E CAMPINAS	1900 A.	1100 A.
S/E SUMARÉ	1700 A.	750 A.
S/E TATU	1600 A.	-
S/E CORDEIRÓPOLIS	1700 A.	1800 A.
S/E CAMAQUÃ	1100 A.	-
S/E ITIRAPINA	1100 A.	-

ix) distâncias desde o marco zero :

	quilometro
S/E LOUVEIRA	15.3
S/E CAMPINAS	45.0
S/E SUMARÉ	69.6
S/E TATU	93.8
S/E CORDEIRÓPOLIS	116.9
S/E CAMAQUÃ	148.8
S/E ITIRAPINA	174.4

x) especificação para convergência - $\Delta U = 3.0$ volts

sobrecargas nas sub-estações - 50% 2 horas
200% 5 minutos

aderência - a 25% de adesão ,
1,8 do esforço tra
tor contínuo máxi
mo.

sobrecorrentes nos motores - 1,1 da corrente
contínua máxima.

xi) impedância série entre sub-estações adjacentes

esquema 1 : 2 cabos mensageiros de alumínio da sec
ção 795.000 ACSR; 2 fios de contato de

cobre de secção 6/0 AWG cada um; 4 trilhos tipo 55 Kg/m cada; "Tie" a cada 61 metros.

$$\rho = 0,049 \text{ ohms/km}$$

esquema 2 : 1 feeder de cobre, de secção 500 MCM, alimentando as duas redes aéreas a cada 300 metros; dois fios de contato de cobre de secção 4/0 AWG cada; 4 trilhos tipo 55 Kg/m cada um.

$$\rho = 0,049 \text{ ohms/km}$$

esquema 3 : 1 feeder de cobre, de secção 500 MCM, alimentando as duas redes aéreas a cada 300 metros; fio de contato de cobre de secção 4/0 AWG ; 2 trilhos tipo 55 Kg/m cada.

$$\rho = 0,10 \text{ ohms/km}$$

3 - O PERFIL DA VIA

A aplicação se desenvolve em um trecho eletrificado pertencente à FEPASA, entre as estações JUNDIAÍ (km. 1.0) e ITIRAPINA (km. 174.0), conforme se mostra nas Figuras 6.3 e 6.4 a seguir.

6.3.1 - A Vista em Planta

A Figura 6.3 mostra a vista em planta de alguns trechos do perfil. Desta Figura pode-se ter uma visão definida da sinuosidade da via, pois cada curva é demarcada pelo seu raio e ângulo central, além da especificação dos limites de velocidade.

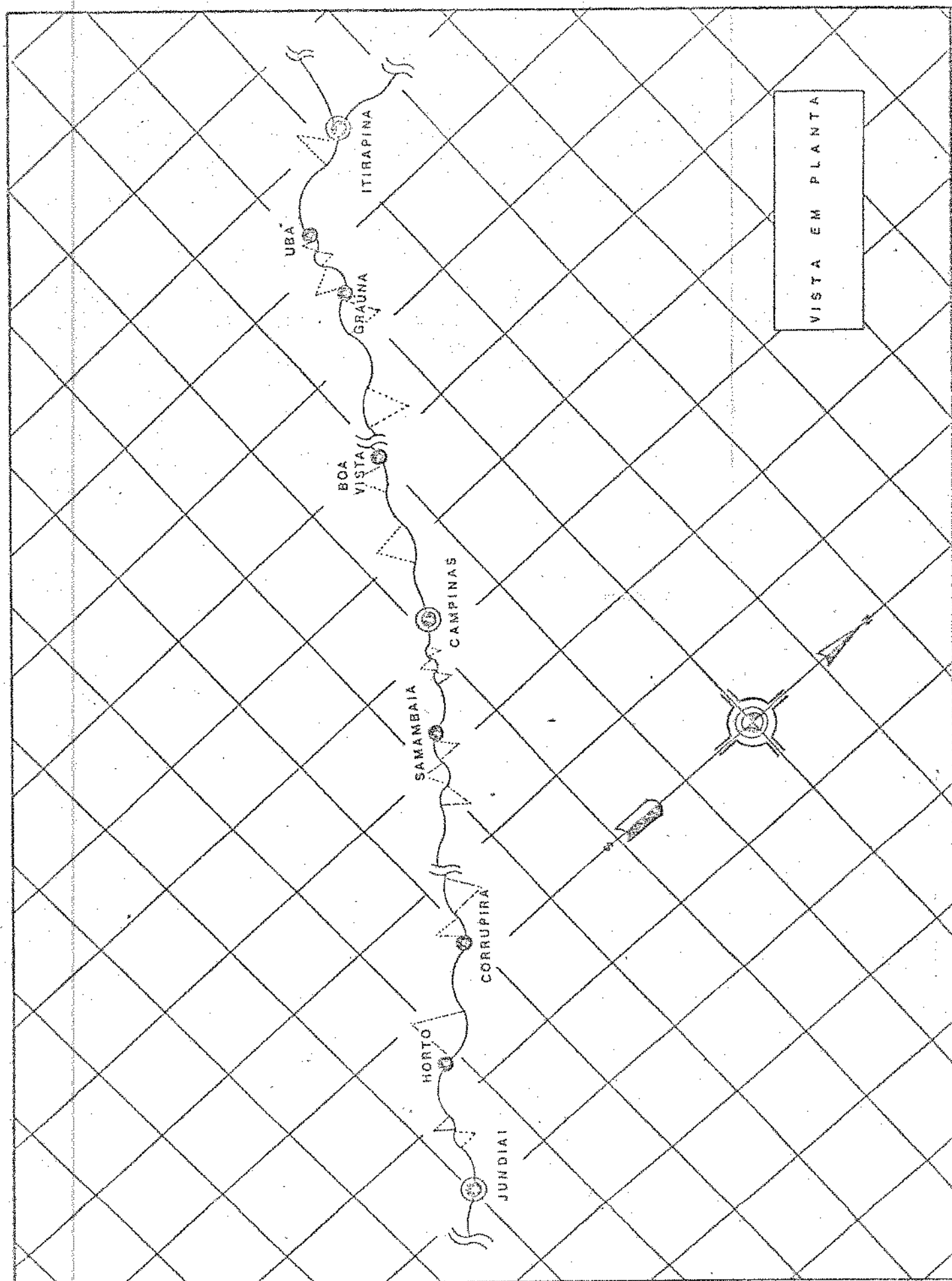
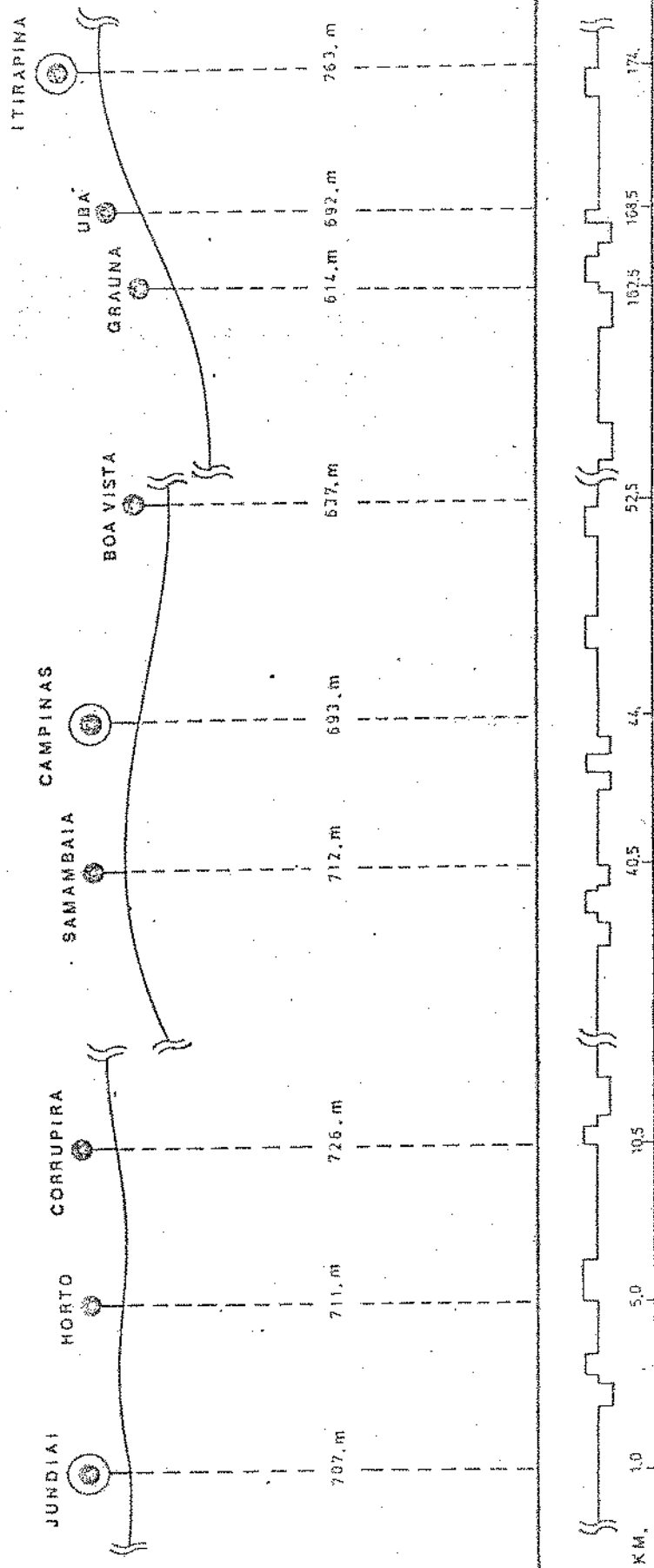


Figura 6.3



VISTA NO PERFIL
LONGITUDINAL

Figura 6.4

6.3.2 - A Vista no Perfil Longitudinal

A Figura 6.4 mostra alguns trechos da vista no perfil longitudinal. Desta Figura são retirados todos os dados relativos às estações ou marcos, quilometragens, altitudes e restrições de velocidade. Conforme frisado no Capítulo IV, a idéia inicial é dividir-se em trechos conforme a situação real melhor se apresente. Assim, os trechos são determinados pelas estações ou marcos onde ocorrem sensíveis mudanças nas altitudes. Portanto o perfil longitudinal fornece as quilometragens e altitudes, iniciais e finais, dos trechos considerados, além de demarcar as curvas através de seus raios e sentido de curvatura.

6.4 - INFORMAÇÕES RELATIVAS AOS TRENS

Sabendo-se, dos dados relativos ao esquema operacional, da quantidade e tipos de trens que deverão circular durante o tempo de simulação especificado, resta detalhar os elementos que formarão os trens.

6.4.1 - Elemento Trator

A locomotiva que será utilizada nesta aplicação, é uma G.E. de 5130 HP, 144 ton., 3000 Volts C. C., cujas informações foram cedidas pela GENERAL ELECTRIC DO BRASIL S.A.

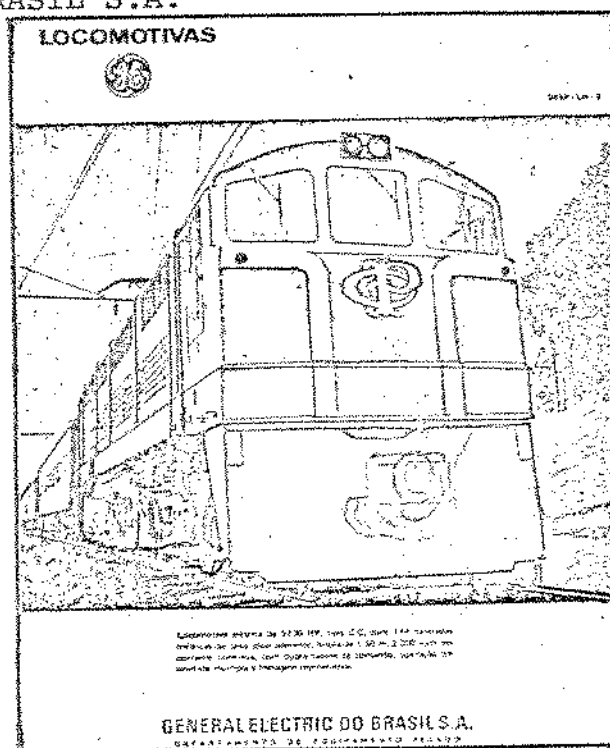
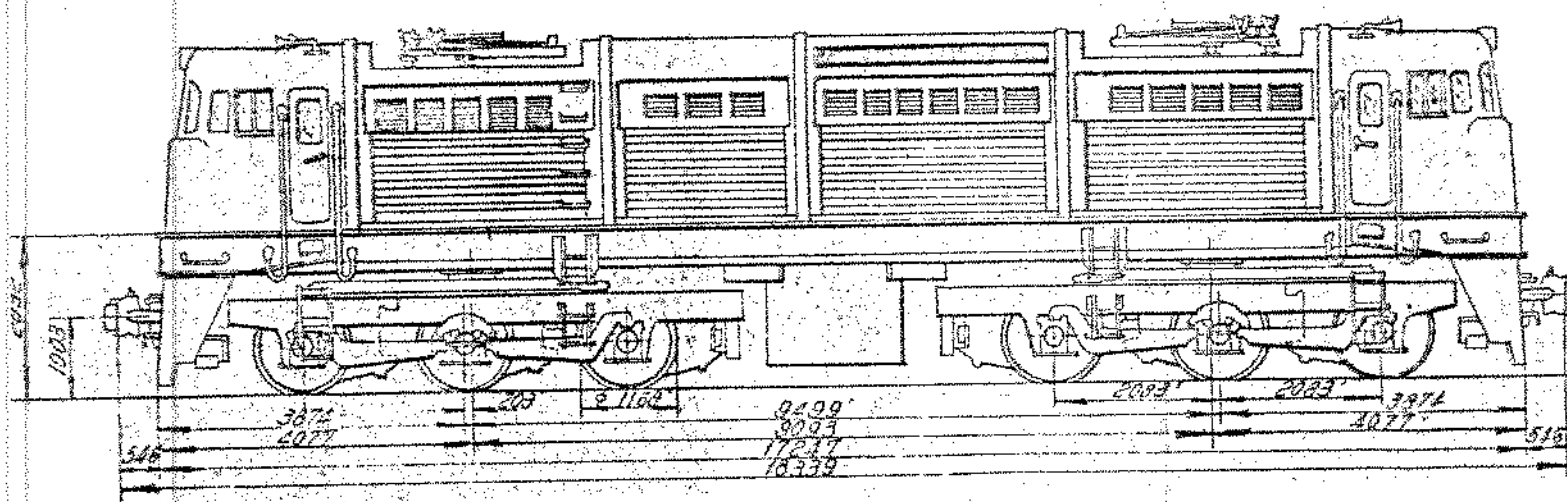
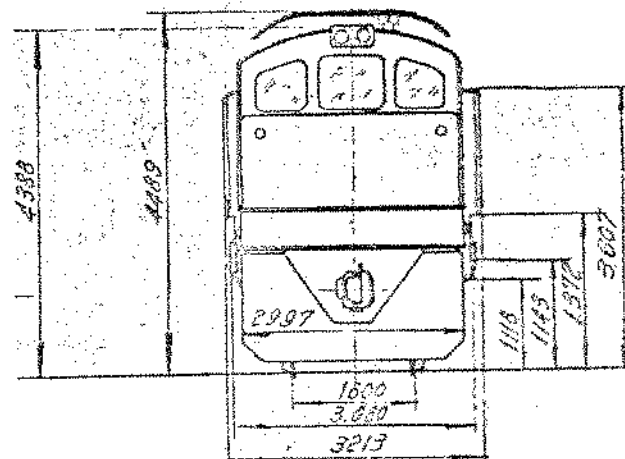


Figura 6.5



Disposição dos eixos	C-C						
Peso total	144.000	Kg					
• da cabina	68.000	•					
• do troque	76.000	•					
• aderente	144.000	•					
• por eixo motor	24.000	•					
• • • guia	-	•					
• aderente kg/C. V. continuo	277	•					
Calibração da relé de sobrecarga	OLR-775 a JA-2300 ~ Amperes						
Sistema de comando	Eletr. pneumático						
Tensão do circuito de comando	75	Volts 73%					
• • • auxiliar	75	•					
Sistema de recuperação	Excitação separada						
Tração dupla	sim						
Freio da tram	Ar comprimido						
Freio da locomotiva	262- Westinghouse / freisombra						
APARELHOS	QUANT.	DIÂMETRO	r. p. m.	ENGE- NAGEM	CILINDRO		DESCARGA
					Diâmetro	Curso	m3/min.
Ventilador	2	34 3/8"	1320				480/unid
Compressor	2	30 8/8"	517		7 3/4"	4 1/8"	2,8
Exaustor	-	-	-	-	-	-	-



CAPACIDADE A 2700 V. ESP. A.L.E.E.	DISCRIMINAÇÃO	CONTÍNUO			UNIHORÁRIO			% DO PESO AGRENTE	
		FS-1	FS-2	FS-3	FS-1	FS-2	FS-3	25 %	30 %
LOCOMOTIVA	Esforço de tração nos eixos	22.000	18.800	16.200	24.600	21.200	18.500	36.000	43.000
	Potência nos eixos em C. V.	4.450	4.450	4.450	4.910	4.910	4.910	5.750	7.900
	Corrente em amperes	1.320	1.320	1.320	1.455	1.455	1.455	2.040	2.355
	Velocidade em km/h.	54,2	63,5	74,2	53,0	62	71	48,6	47
	Eficiência com engrenagem	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92	91,5
MOTORES	Tipo — número	5 GE 729 FI - 6			DISCRIMINAÇÃO			CONTÍNUO	
	Tensão em volta	1500/3000			Potência C. V.			741	
	Relação de engrenagem	71/21 = 3,38			Corrente amperes			443	
	Sistema de transmissão	Engrenagem sólida			Velocidade r. p. m.			845	
								UNIHORÁRIO	

MOTORES E GERADORES	DISCRIMINAÇÃO	QUANT.	TENSÃO	CORRENTE	KW	C.V.	r.p.m.
	Motor auxiliar	1	3000	40	120	160	
	Gerador "	1	50	1200	60	80	
	Dinamotor	-	-	-	-	-	
	Motor do excitador	1	3000	40	120	160	
	Excitador	1	50	1200	60	80	
	Motor do ventilador	-	-	-	-	-	
	• • compressor	-	-	-	-	-	
	• • exaustor	-	-	-	-	-	

Figura 6.6

Estas locomotivas são equipadas com motores GE-729/1500 Volts C.C., que tem suas características de saturação com carga e rendimento mostrados no Apêndice C.

6.4.2 - Elementos Rebocados

Quanto aos carros, serão todos de passageiros e em número de 9 por composição; terão um peso unitário (considerando-se os usuários) de 56 toneladas; 4 eixos; área frontal de $12,0 \text{ m}^2$ e comprimento de 25,9 metros.

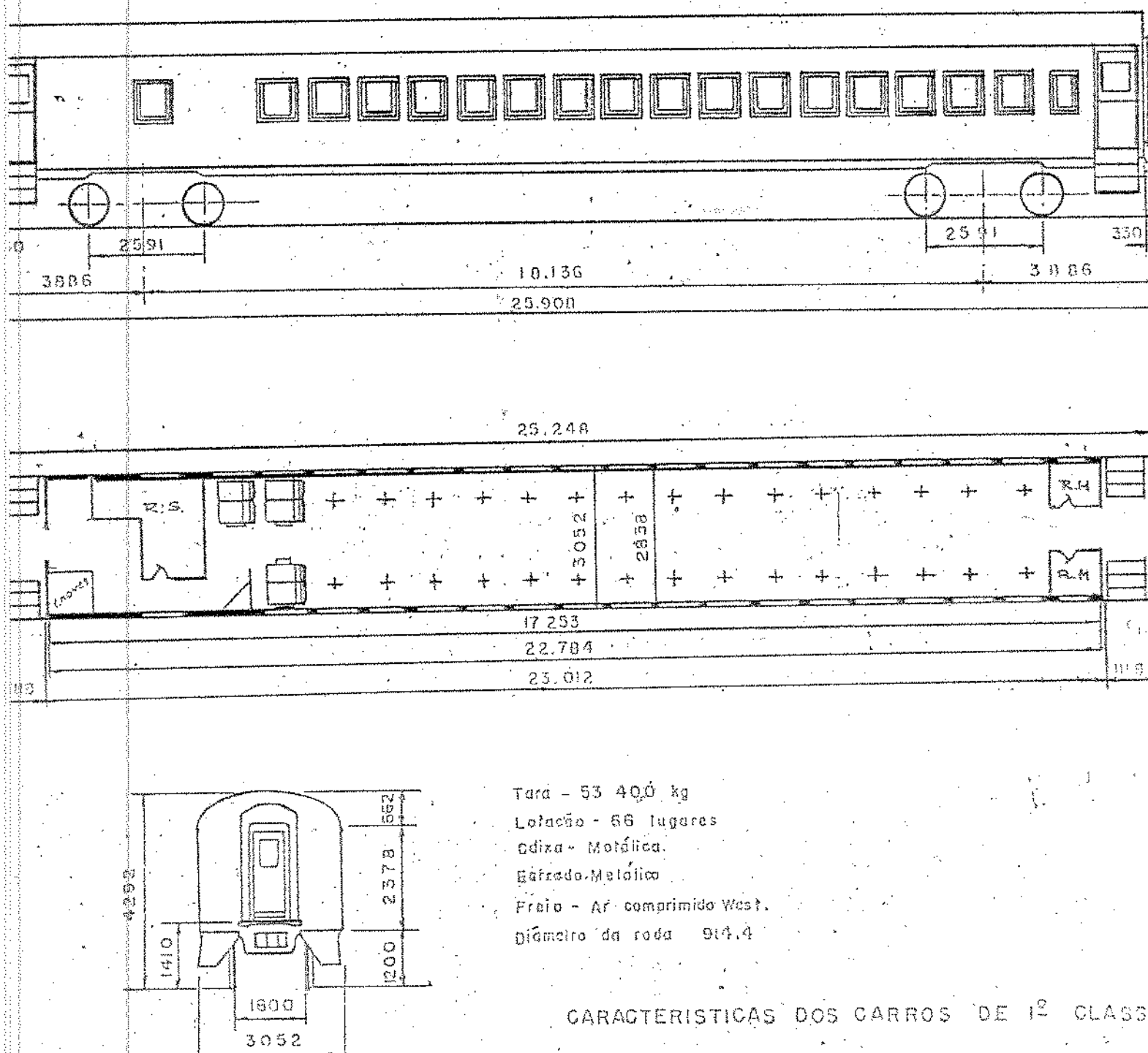


Figura 6.7

6.5 - AS SIMULAÇÕES BÁSICAS DOS MOVIMENTOS DOS TRENS NOS PERCURSOS

As simulações dos movimentos dos trens nos percursos reais, para fornecer os desempenhos nos perfis definidos, são mostradas como um exemplo no Apêndice D.

6.6 - OS RESULTADOS DA APLICAÇÃO PRÁTICA

Como resultados desta aplicação prática, serão mostrados alguns instantâneos da simulação onde se poderá avaliar o acoplamento dos esquemas operacionais e elétricos. Nestes instantâneos se mostram :

- i) hora da simulação -
comandada pelo relógio mestre (definido no Capítulo IV).
- ii) solução do fluxo de carga -
onde aparecem inicialmente as intensidades nas sub-estações e depois nos trens.
- iii) acoplamento do esquema operacional ao elétrico -
onde se pode ter uma idéia física dos trens no perfil.
- iv) tempo de simulação decorrido.

Acompanham estes instantâneos, os respectivos diagramas elucidativos.

RELOGIO

*
*
* H O R A *
*
* 1 9 8 5 1 4 *
*
*

ESTUDO ENERGETICO EM FERROVIA

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

CORRENTE (AMP)	TENSAO (VOLT)	QUEDAS (VOLT)
285.67	2897.17	182.93
485.75	2757.12	242.88
138.18	2938.95	69.85
97.42	2953.79	46.21
254.34	2872.83	127.17
68.78	2969.61	30.39
9.93	2995.63	4.97
346.65	2677.61	322.39
75.36	2983.26	96.74
368.89	2769.34	230.66
464.89	2664.91	335.89

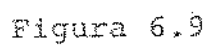
BARRA/TREM	DISTANCIA (KM)	VELOCIDADE (KM/H)	MOOO	CORRENTE (A)	TENSAO (VOLT)	POTENCIA (KW)
8 P06	48.51	89.85	6	346.65	2677.61	928.24
9 P25	84.99	46.84	1	75.36	2983.26	218.79
8 P28	128.48	98.42	6	368.89	2769.34	997.22
4 P07	37.89	87.56	7	464.89	2664.91	1238.88

Figura 6.8

ESTUDO ENERGÉTICO

CONVENÇÕES

MEM FRROVIA

[illegible]

RELOGIO

* *
* H O R A *
* *
* 18:25:57 *
* *
* *

ESTUDO ENERGETICO EM FERROVIA

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

CORRENTE (AMP)	TENSAO (VOLT)	QUEDAS (VOLT)
2,59	2998,71	1,29
18,58	2994,75	5,25
74,87	2962,57	37,43
268,56	2869,72	138,28
-16,41	3038,21	-8,21
-1,95	3090,97	-2,97
-0,32	3030,16	-0,16
0,88	2995,84	4,96
429,83	2774,27	275,73
-188,88	3013,29	-13,29
0,88	2994,98	5,02

SERIAL	TIPO	DISTANCIA (KM)	VELOCIDADE (KM/H)	MODULO	CORRENTE (A)	TENSAO (VOLT)	POTENCIA (KW)
8	P06	13,78	8,98	8	0,88	2995,84	0,84
9	P05	91,81	79,82	6	429,83	2774,27	1192,45
10	P08	131,45	98,88	21	-188,88	3013,29	-301,33
11	P07	14,12	9,88	8	0,88	2994,98	0,84

Figura 6,10

Figura 6.11

R E L O G I O

*
* H O R A *
* 11.0 3.9 *
*

E S T U D O E N E R G E T I C O E M F E R R O V I A

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

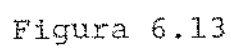
CORRENTE (AMP)	TENSAO (VOLT)	QUEDAS (VOLT)
218.62	2885.64	114.31
497.48	2751.30	248.70
183.18	2948.35	51.65
193.29	2983.36	96.64
126.89	2936.96	63.84
14.97	2992.51	7.49
2.45	2998.78	1.22
744.14	2609.19	308.81
355.18	2775.63	224.37
8.88	2853.30	145.78
66.18	2754.43	245.57

SAFRA/TREM	DISTANCIA (KM)	VELOCIDADE (KM/H)	MOD0	CORRENTE (A)	TENSAO (VOLT)	POTENCIA (KW)
8 P05	39.49	84.82	8	744.14	2609.19	1942.11
9 P05	94.85	91.51	6	355.18	2775.63	986.11
10 P04	125.24	8.88	8	8.88	2853.30	9.89
11 P07	16.73	16.73	1	66.18	2754.43	182.31

Figura 6.12

CONVENÇÕES

LINHA DUPLA
 LINHA SINGELA
 REYACAO
 MARCO
 SUB-ESTACAO
 TREN
 CORRENYE



RELOGIO

* *
* H O R A *
* *
* 11:09:58 *
* *
* *

ESTUDO ENERGETICO EM FERROVIA

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

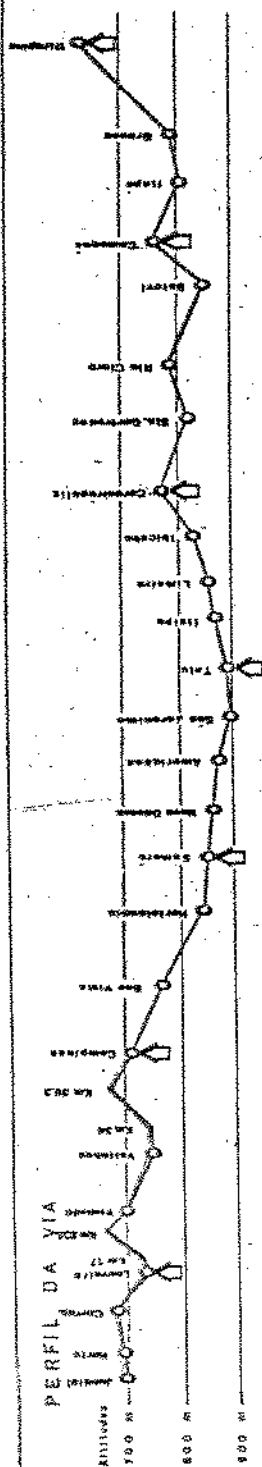
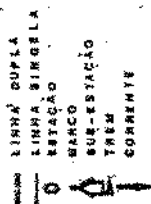
CORRENTE (AMP)	TENSAO (VOLT)	ORDAS (VOLT)
199.18	2982.41	99.59
218.28	2894.86	185.14
52.72	2973.64	26.36
37.12	2981.44	18.56
44.87	2977.97	22.83
8.93	2997.38	2.62
8.85	2999.57	0.43
199.44	2749.35	258.65
8.88	2949.73	50.27
84.85	2944.71	55.29
65.96	2885.92	114.88

BARRA	TREM	DISTANCIA (KM)	VELOCIDADE (KM/H)	MOOD	CORRENTE (A)	TENSAO (VOLT)	POTENCIA (KW)
8	POB	32.47	33.31	6	199.44	2749.35	1894.21
9	POS	185.64	9.88	0	8.88	2949.73	2.63
3	POB	194.61	14.85	1	84.85	2944.71	247.54
1	POB	53.92	49.12	1	65.96	2885.92	193.35

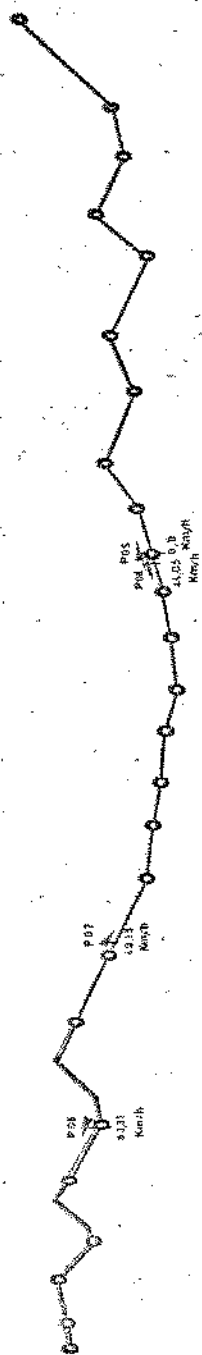
Figura 6.14

CONVENÇÕES.

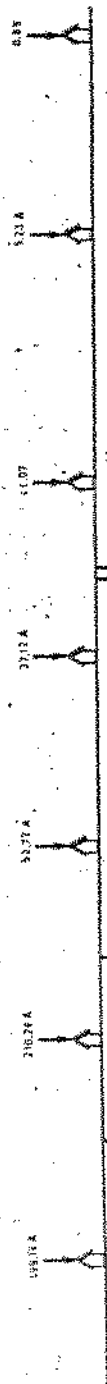
HORA 11.05.0



PERFIL DOS TRENDS



PERFIL DAS CORRENTES



SECRET

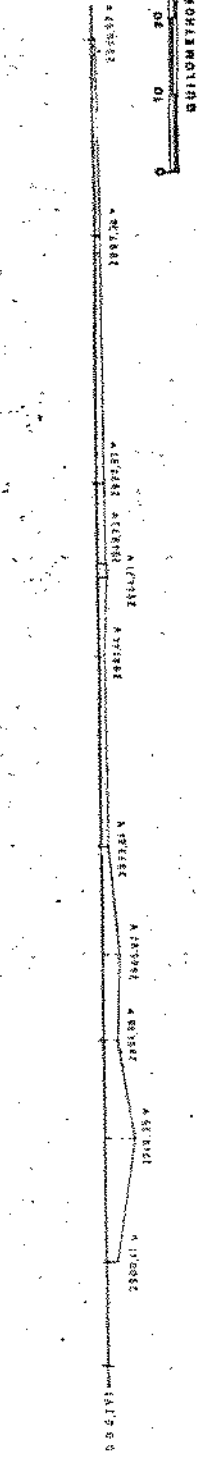


Figura 6.15

RELOGIO

*
* H O R A *
*
* 11:27:58 *
*

ESTUDO ENERGÉTICO EM FERROVIA

SOLUCAO DO FLOXO DE CARGA

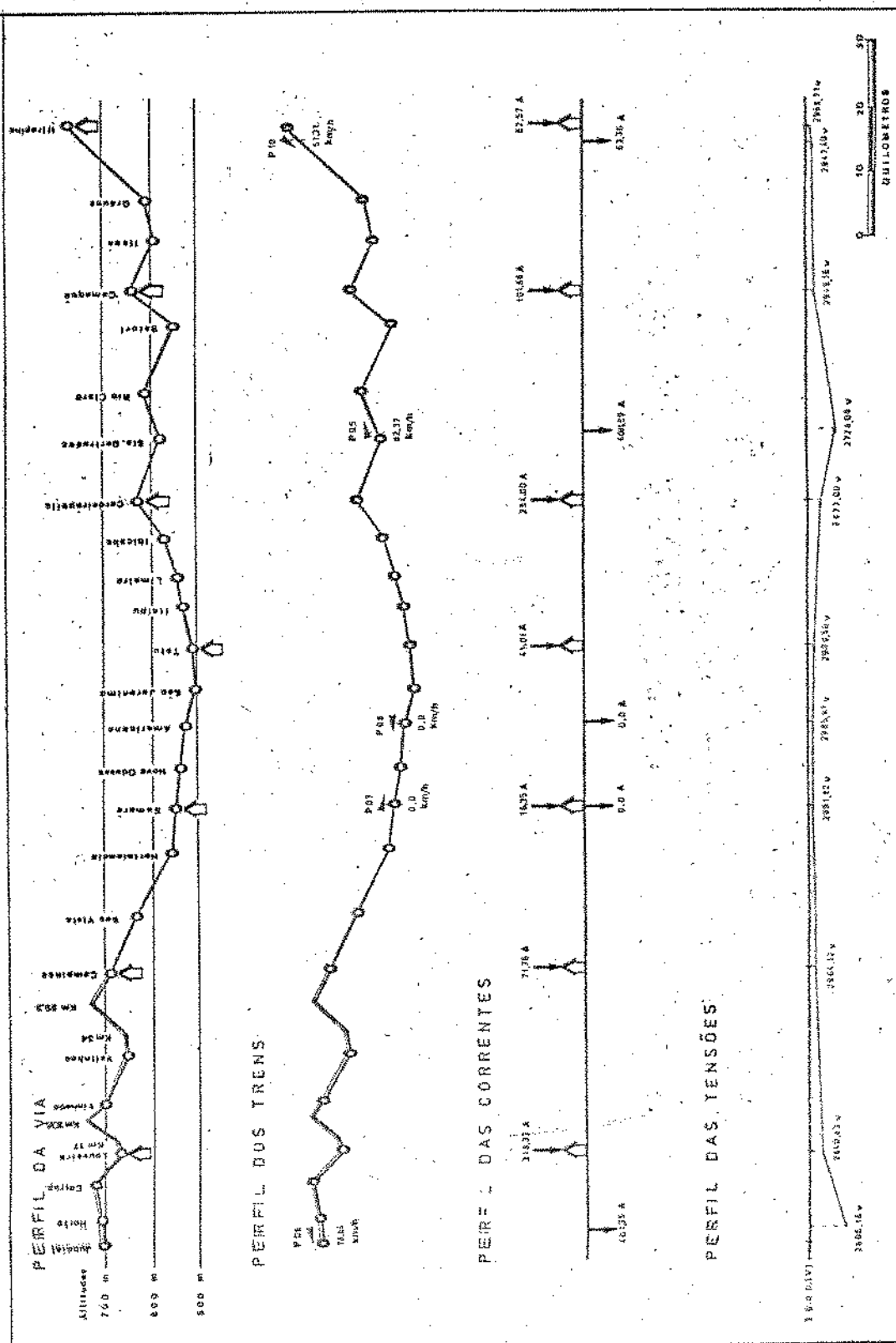
CORRENTE (AMP)	TENSAO (VOLT)	QUEDAS (VOLT)
318,33	2848,83	159,17
71,76	2964,12	35,88
16,35	2991,82	8,18
41,81	2979,58	28,58
254,88	2873,88	127,98
181,68	2949,16	58,84
62,57	2968,71	31,29
441,35	2636,16	393,84
448,99	2726,84	273,91
8,88	2985,61	14,38
8,88	2991,74	8,26
63,36	2947,48	52,68

BARRA	TIPO	DISTANCIA (KM)	VELOCIDADE (KM/H)	MODELO	CORRENTE (A)	TENSAO (VOLT)	POTENCIA (KW)
8	P06	3,61	78,54	6	431,35	2636,16	1045,42
8	P05	126,81	82,37	6	493,99	2726,89	1093,11
10	P08	81,79	8,88	8	8,88	2985,61	4,38
10	P07	89,76	8,88	8	8,88	2991,74	8,26
12	P10	112,79	51,31	1	63,36	2947,48	185,75

Figura 6.16

CONVENTIONS

Linha Dupla
Linha Singela
Estacão
Marco
Sub-estação
Yren
Convenye



CRITERIO DO DESEMPENHO	132,384	MIN/HORA
ELETRICO		
TEMPO DE SIMULACAO	361 HORAS	

TEMPOS DE ESPERA		MINUTOS	
TEMPO DE ESPERA	P85	4.00	
TEMPO DE ESPERA	P86	10.00	
TEMPO DE ESPERA	P87	15.00	
TEMPO DE ESPERA	P88	1.00	
TEMPO DE ESPERA	P89	0.00	

CRITERIO DE ATRASO		MINUTOS	
CRITERIO DE ATRASO	48.00		

Figura 6.18

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MOVIMENTO DOS TRENS

DIAGRAMA ESPAÇO X TEMPO

* TREM NO SENTIDO IMPORTAÇÃO

* TREM NO SENTIDO EXPORTAÇÃO

PARADAS PROGRAMADAS : KM, ESTAÇÃO

174.0	ITIRA
133.0	RODAR
105.5	LIMEI
82.0	AMERI
69.0	SUMAR
44.0	CAMP
1.0	JUNDI

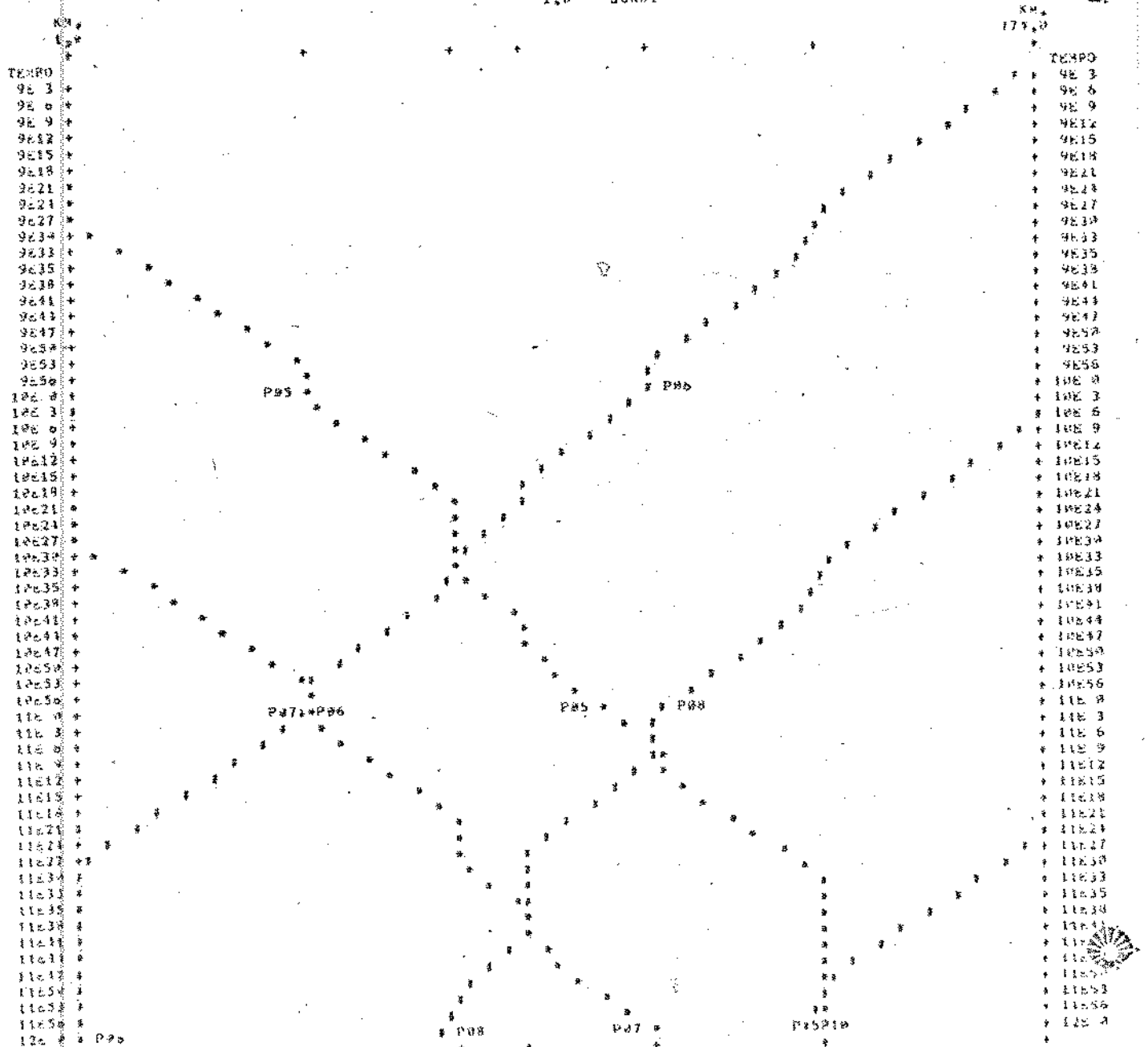


Figura 6.19

CAPÍTULO VII

No Brasil, país de dimensões continentais, que jamais chegou a contar com uma rede ferroviária adequada, sente-se a necessidade de valorizar tal meio de transporte, dele retirando os benefícios que só uma densa malha ferroviária eletrificada pode proporcionar.

O modelo de simulação proposto neste trabalho pode ser eficientemente aplicado ao estudo do planejamento de tais malhas. Um estudo exaustivo da rede, perfeitamente viável em computador, pode fornecer os subsídios necessários para uma futura interligação dos sistemas ferroviários do país, estabelecendo as condições operacionais e elétricas de uma perfeita malha ferroviária interligada.

A representação das locomotivas, por meio de equações terminais, baseadas nas curvas de saturação dos motores para diferentes velocidades de referência, e dos sistemas elétricos de alimentação em corrente contínua, possibilita manipular diretamente as variáveis de maior interesse elétrico (quedas de tensão e correntes), como também as de caráter operacional (velocidades, acelerações, etc). Assim, o algoritmo de simulação desenvolvido neste estudo, justifica sua aplicação imediata em níveis de operação, o que demonstra a versatilidade que este modelo encerra.

Uma sequência da pesquisa deverá incluir o desenvolvimento de um algoritmo de otimização, que permita minimizar uma determinada função objetivo, através da aplicação de controles ótimos sobre os trens (8). Existe também a possibilidade de se aproveitar este trabalho, para a aplicação de um método de alocação ótima de sub-estações de tração, em planejamento a médio e longo prazo (14). Outra abertura à pesquisa, é generalizar o algoritmo apresentado, para sistemas ferroviários eletrificados em corrente alternada, usando métodos desacoplados (9).

APÊNDICE A

Neste apêndice será mostrado o método usado para aproximar as curvas características dos motores de tração e das locomotivas, por equações matemáticas pré-fixadas.

A.1 - O MÉTODO ITERATIVO

Este método estima os parâmetros de uma equação a multivariáveis da forma:

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_K; A_0, A_1, A_2, \dots, A_M) \quad (A.1)$$

utilizando N pontos como dados de entrada para Y_i e x_{ki} , $i = 1, 2, \dots, N$ e $k = 1, 2, \dots, K$.

A idéia do método se baseia em uma linearização do modelo proposto, utilizando-se de uma função objetivo de mínimos quadrados.

A.2 - O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O modelo é linearizado, expandindo-se Y_i em uma série de Taylor sobre os valores práticos fornecidos, re^{te}n^{do}-se apenas os termos lineares:

$$Y_i = Y_i^{(0)} + \left[\frac{\partial Y_i}{\partial A_0} \right]^{(0)} \Delta A_0 + \left[\frac{\partial Y_i}{\partial A_1} \right]^{(0)} \Delta A_1 + \dots + \left[\frac{\partial Y_i}{\partial A_M} \right]^{(0)} \Delta A_M \quad (A.2)$$

$$\text{onde } \Delta A_j = \left[A_j^* - A_j^{(0)} \right], \quad j = 0, 1, 2, \dots, M$$

(*) valor esperado

(0) valor inicial suposto

Uma função objetivo de mínimos quadrados é formulada:

$$\text{minimizar } \xi = \left[\dot{Y} - Y \right]^T \cdot \left[\dot{Y} - Y \right] \quad (A.3)$$

onde (•) valor especificado

Chamando em um iteração (v) qualquer:

$$M^{(v)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_1^{(v)}}{\partial A_0} & \frac{\partial Y_1^{(v)}}{\partial A_1} & \dots & \frac{\partial Y_1^{(v)}}{\partial A_M} \\ \frac{\partial Y_2^{(v)}}{\partial A_0} & & & \\ \frac{\partial Y_N^{(v)}}{\partial A_0} & \dots & \dots & \frac{\partial Y_N^{(v)}}{\partial A_M} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\Delta Y}^{(v)} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_1 - Y_1^{(v)} \\ \dot{Y}_2 - Y_2^{(v)} \\ \dot{Y}_N - Y_N^{(v)} \end{bmatrix} \quad e \quad \underline{\Delta A}^{(v)} = \begin{bmatrix} A_0^* - A_0^{(v)} \\ A_1^* - A_1^{(v)} \\ A_N^* - A_N^{(v)} \end{bmatrix}$$

o desenvolvimento em Taylor fica:

$$\underline{Y} = \underline{Y}^{(v)} + M^{(v)} \cdot \underline{\Delta A}^{(v)} \quad (A.4)$$

Substituindo-se o modelo linearizado na função objetivo e igualando-se as derivadas parciais desta função, com relação a cada coeficiente, a zero:

$$\frac{\partial \xi}{\partial A_j} = 0 \quad , \quad j = 0, 1, 2, \dots, M \quad (A.5)$$

$$\text{resulta} \quad (M^{(v)})^T \cdot (\underline{\dot{Y}} - \underline{Y}^{(v)}) = (M^{(v)})^T \cdot M^{(v)} \cdot \underline{\Delta A}^{(v)} \quad (A.6)$$

e portanto

$$\underline{\Delta A}^{(v)} = \left[(M^{(v)})^T \cdot M^{(v)} \right]^{-1} \cdot (M^{(v)})^T \cdot (\underline{\dot{Y}} - \underline{Y}^{(v)}) \quad (A.7)$$

O método Marquardt (7) se caracteriza por acrescentar um fator λ a cada termo da diagonal principal da matriz $(M^{(v)})^T \cdot M^{(v)}$, modificando o sistema de equações algébricas

cas lineares formado por (A.7), para:

$$\Delta \underline{A}^{(v)} = \left[(\underline{M}^{(v)})^T \cdot \underline{M}^{(v)} + \lambda \underline{I} \right]^{-1} \cdot (\underline{M}^{(v)})^T \cdot (\underline{\dot{Y}} - \underline{Y}^{(v)}) \quad (\text{A.8})$$

Os métodos do tipo Newton convergem quando a estimativa inicial estiver próxima da solução. Quando uma boa estimativa não for disponível, o método apresenta problemas de convergência. Para evitar tais problemas, nas primeiras iterações λ assume valores grandes, e o método se torna idêntico a um "Steepest Descent". Porém, à medida que o ótimo se aproxima, λ assume valores pequenos, e o método se reduz a um Gauss-Newton.

A.3 - A APLICAÇÃO DO MÉTODO

Neste trabalho utilizou-se várias vezes este algoritmo, para se adequar equações matemáticas às curvas dos motores de tração e das locomotivas. A sequência para a aplicação do método:

- i) obter experimentalmente ou através das curvas do fabricante, os pontos que constituem o arquivo de dados.
- ii) escolher adequadamente um modelo de equação que se ajuste às características da curva prática ou experimental.
- iii) escolher valores apropriados para os coeficientes da equação, visando um tempo de solução reduzido.
- iv) aplicar o algoritmo.

Para exemplificar vamos supor uma determinada aplicação do método:

- i) conjunto de dados formado por $\hat{x}_i$ e $\hat{y}_i$
 $i = 1, 2, 3$
- ii) modelo de um polinômio em grau 3

$$y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3$$

iii) valores iniciais $A_j^{(0)}$, $j = 0, 1, 2, 3$

iv) aplicar o algoritmo:

passo 1 - $v = 0$

passo 2 - $y_i^{(v)} = A_0^{(v)} + A_1^{(v)} \hat{x}_i + A_2^{(v)} \hat{x}_i^2 + A_3^{(v)} \hat{x}_i^3$

$i = 1, 2, 3$

passo 3 - $\Delta y^{(v)} = (\hat{y}_i - y_i^{(v)})$, $i = 1, 2, 3$

passo 4 - $M^{(v)} = \begin{bmatrix} \frac{\delta y_i^{(v)}}{\delta A_0} & \frac{\delta y_i^{(v)}}{\delta A_1} & \frac{\delta y_i^{(v)}}{\delta A_2} & \frac{\delta y_i^{(v)}}{\delta A_3} \end{bmatrix}$

$i = 1, 2, 3$

passo 5 - $\Delta \underline{A}^{(v)} = \left[(M^{(v)})^T \cdot M^{(v)} + \lambda I \right]^{-1} \cdot (M^{(v)})^T \cdot \Delta \underline{y}^{(v)}$

passo 6 - satisfaz convergência?

passo 7 - não: $v = v + 1$

$$\underline{A}^{(v)} = \underline{A}^{(v-1)} + \Delta \underline{A}^{(v-1)}$$

volta ao passo 2.

passo 8 - sim: $\underline{A}^* = \underline{A}^{(v)} + \Delta \underline{A}^{(v)}$

fim.

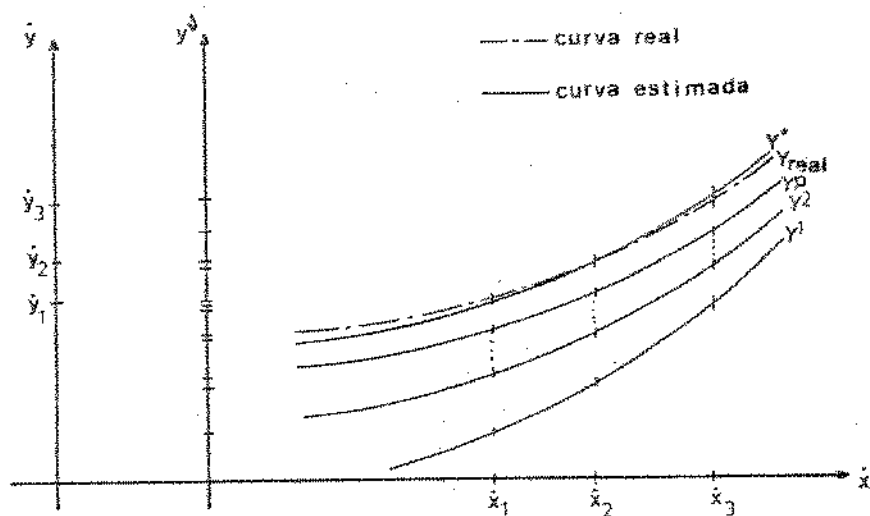


Figura A.1

APÊNDICE B

Neste apêndice será mostrada a solução de equações algébricas lineares, através da aplicação de operações elementares sobre matrizes esparsas.

B.1 - MÉTODO DA ELIMINAÇÃO DE GAUSS

Em várias fases deste trabalho buscou-se a solução $\underline{x}$ de um sistema de equações lineares da forma

$$\underline{Ax} = \underline{b} \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

O processo da eliminação de Gauss se desenvolve em duas etapas, e consiste em eliminar sucessivamente as linhas e colunas da matriz A, até que fique reduzida à identidade.

i) etapa "FORWARD" - (zerar o triângulo inferior da matriz)

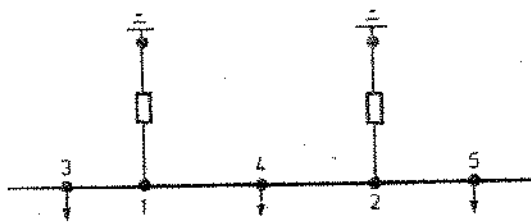
$$\begin{bmatrix} 1 & a'_{12} & a'_{13} & \dots & a'_{1n} \\ 0 & 1 & a'_{23} & \dots & a'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ \vdots \\ b'_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

ii) etapa "BACKWARD" - (zerar o triângulo superior da matriz)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b''_1 \\ b''_2 \\ \vdots \\ b''_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Desta forma, a solução do sistema de equações (B.1) fica determinada.

Um exemplo prático ilustrará melhor o método:



subestações - 1 2

trens - 3 4 5

Figura B.1

O sistema de equações algébricas lineares a ser resolvido:

$$Y \cdot \Delta U = \underline{I} \quad (B.4)$$

onde:

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} \quad - \text{vetor de correntes}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} & Y_{14} & 0 \\ 0 & Y_{22} & 0 & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & 0 & Y_{33} & 0 & 0 \\ Y_{41} & Y_{42} & 0 & Y_{44} & 0 \\ 0 & Y_{52} & 0 & 0 & Y_{55} \end{bmatrix} \quad - \text{matriz admitância}$$

ΔU - vetor de quedas de tensão

Aplicando as etapas do método à matriz Y :

"FORWARD" -

$$\text{PASSO 1} \quad \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} & Y_{14} & 0 \\ 0 & Y_{22} & 0 & Y_{24} & Y_{25} \\ 0 & 0 & Y_{33}^1 & Y_{34}^1 & 0 \\ Y_{41} & Y_{42} & 0 & Y_{44} & 0 \\ 0 & Y_{52} & 0 & 0 & Y_{55} \end{bmatrix} = Y_1$$

$$\text{PASSO 2} \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} & Y_{14} & 0 \\ 0 & Y_{22} & 0 & Y_{24} & Y_{25} \\ 0 & 0 & Y_{33}^1 & Y_{34}^1 & 0 \\ 0 & Y_{42} & Y_{43}^2 & Y_{44}^2 & 0 \\ 0 & Y_{52} & 0 & 0 & Y_{55} \end{bmatrix} = Y_2$$

$$\text{PASSO 3} \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} & Y_{14} & 0 \\ 0 & Y_{22} & 0 & Y_{24} & Y_{25} \\ 0 & 0 & Y_{33}^1 & Y_{34}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{43}^2 & Y_{44}^3 & Y_{45}^3 \\ 0 & Y_{52} & 0 & 0 & Y_{55} \end{bmatrix} = Y_3$$

$$\begin{array}{l} \text{PASSOS} \\ 7,8,9,10,11 \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & Y_{13}^7 & Y_{14}^7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{24}^8 & Y_{25}^8 \\ 0 & 0 & 1 & Y_{34}^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & Y_{45}^{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = Y_{11}$$

"BACKWARD" -

$$\text{PASSO 12} \begin{bmatrix} 1 & 0 & Y_{13}^7 & Y_{14}^7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{24}^8 & Y_{25}^8 \\ 0 & 0 & 1 & Y_{34}^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = Y_{12}$$

$$\text{PASSO 13} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_{13}^7 & y_{14}^7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{24}^8 & y_{25}^8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = Y_{13}$$

$$\text{PASSO 17} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = Y_{17}$$

B.2 - DECOMPOSIÇÃO LDU

As mesmas etapas realizadas no item anterior, podem ser interpretadas através de operações elementares com matrizes :

$$\text{"FORWARD"} - \quad \text{PASSO 1} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -y_{31}/y_{11} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y = Y_1$$

$$\text{PASSO 2} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -y_{41}/y_{11} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y_1 = Y_2$$

PASSO 3

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -y_{42}/y_{22} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y_2 = Y_3$$

PASSOS
7,8,9,10 e 11

$$\begin{bmatrix} 1/y_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/y_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/y_{33}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/y_{44}^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/y_{55}^6 \end{bmatrix} \cdot Y_{6,7,8,9,10} = Y_{7,8,9,10,11}$$

"BACKWARD" -

PASSO 12

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -y_{45}^{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y_{11} = Y_{12}$$

PASSO 13

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -y_{34}^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y_{12} = Y_{13}$$

PASSO 17

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{13}^7 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Y_{16} = Y_{17}$$

Classificando-se as matrizes operadoras dos passos de 1 a 6 como um "operador inferior", as matrizes dos passos de 12 a 17 como um "operador superior" e as dos passos de 7 a 11 como um "operador diagonal", e, sobrepondo-se (multiplicando-se) estes operadores inferior, diagonal e superior, resulta a chamada Decomposição LDU.

$$\begin{bmatrix} y_{11} & 0 & y_{13} & y_{14} & 0 \\ 0 & y_{22} & 0 & y_{24} & y_{25} \\ y_{31} & 0 & y_{33} & 0 & 0 \\ y_{41} & y_{42} & 0 & y_{44} & 0 \\ 0 & y_{52} & 0 & 0 & y_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ y_{31}/y_{41} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ y_{41}/y_{11} & y_{42}/y_{22} & y_{43}^2/y_{33}^1 & 1 & 0 \\ 0 & y_{52}/y_{22} & 0 & y_{54}^5/y_{44}^4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_{33}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{44}^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_{55}^6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_{13}^7 & y_{14}^7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{24}^8 & y_{25}^8 \\ 0 & 0 & 1 & y_{34}^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & y_{45}^{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = L D U$$

(B.5)

B.3 - APLICAÇÃO EM MATRIZES ESPARSAS

Resolvendo-se o sistema de equações algébricas lineares dado por (B.4), e utilizando-se as relações e operadores definidos, obtém-se :

$$\Delta \underline{U} = (U_{45}(U_{34}(U_{25}(U_{24}(U_{14}(U_{13}(D_5(D_4(D_3(D_2(D_1(L_{54}(L_{52}(L_{43} \dots$$

$$(L_{42}(L_{41}(L_{31}(\underline{I}) \dots)) \quad (B.6)$$

Como a matriz Y é simétrica, outra vantagem computacional pode ser obtida, uma vez que se verifica a relação :

$$L^T = U \quad (B.7)$$

Portanto,

$$\Delta \underline{U} = (U_{45}(U_{34}(U_{25}(U_{24}(U_{14}(U_{13}(D_5(D_4(D_3(D_2(D_1(U_{45}(U_{25}(U_{34} \dots$$

$$(U_{24}(U_{14}(U_{13}(\underline{I}) \dots))$$

Isto significa que, para se transformar o vetor de correntes (I) no vetor solução (ΔU), basta apenas conhecer os valores de

u_{kl} e d_{kk} - elemento não nulo da linha k e coluna l da triangular superior (U) e pivô da linha k da diagonal (D).

Porém, se a matriz além de simétrica também for es
parsa, é possível armazenar os elementos e apontadores dos e
lementos não nulos em vetores de dimensão reduzida, economizan
do-se muita memória.

Utilizando-se para o exemplo o armazenamento propos-
to por Tinney (15), evidencia-se a economia de memória:

D	LOCY	U	KOLY
d_{11}	1	u_{13}	3
d_{22}	3	u_{14}	4

D	LOCY	U	KOLY
d_{33}	5	u_{24}	4
d_{44}	6	u_{25}	5
d_{55}	-	u_{34}	4
		u_{45}	5

B.4 - OS CRITÉRIOS DE ORDENAÇÃO

O esforço computacional depende basicamente do número de termos não nulos das matrizes triangulares usadas, e é fácil constatar (ver eliminação no exemplo do item B.1) que a esparsidade da matriz triangularizada, é afetada pela ordem de pivoteamento na matriz original. Portanto é conveniente adotar-se critérios de ordenação, visando reduzir ao mínimo o número de elementos não nulos das matrizes triangulares (L) ou (U). Os critérios de ordenação equivalem a uma renumeração dos nós, e consequentemente das equações.

Segue-se alguns esquemas básicos de renumeração:

i) qualquer -

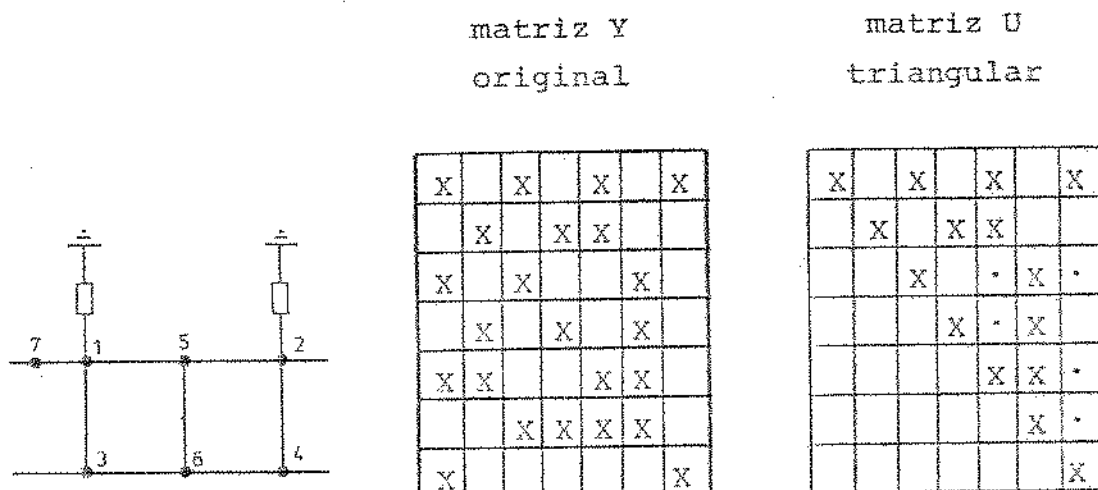
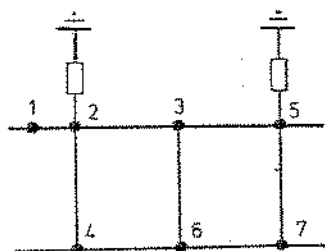


Figura B.2

(X) elemento original

(.) elemento novo

ii) banda - a ordenação se inicia por um nó arbitrário; a seguir são numerados todos os nós vizinhos (um ramo); em seguida são numerados todos os nós vizinhos dos nós resultantes do passo anterior, e assim por diante até que todos os nós tenham sido numerados.



matriz Y
original

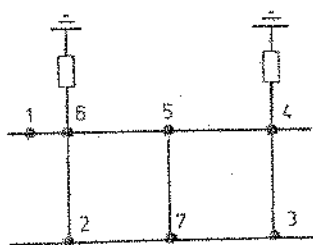
X	X					
X	X	X	X			
	X	X		X	X	
	X		X		X	
		X		X		X
		X	X		X	X
				X	X	X

matriz U
triangular

X	X					
	X	X	X			
		X	.	X	X	
			X	.	X	
				X	.	X
					X	X
						X

Figura B.3

iii) grau mínimo - a ordenação é feita segundo o número de ligações dos nós no circuito original.



matriz Y
original

X					X	
	X				X	X
		X	X			X
		X	X	X		
			X	X	X	X
X	X			X	X	
	X	X		X		X

matriz U
triangular

X					X	
	X				X	X
		X	X			X
			X	X		.
			X	X	X	
				X	.	
						X

Figura B.4

iv) grau mínimo dinâmico - a ordenação é feita segundo o número de ligações dos nós no circuito reduzido, considerando-se eliminados todos os nós já processados. Isto equivale a formar, a cada passo, a equação com o menor número de elementos não nulos na matriz reduzida.

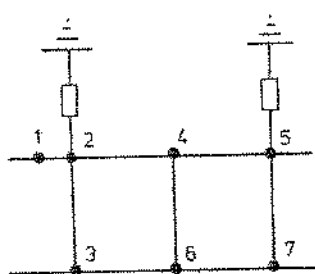


Figura B.5

matriz Y
original

X	X					
X	X	X	X			
	X	X			X	
	X		X	X	X	
			X	X		X
		X	X		X	X
				X	X	X

matriz U
triangular

X	X					
	X	X	X			
		X			X	
			X	X	X	
				X		X
					X	X
						X

Pode-se formular outros critérios mais elaborados, que levam a ganhos de memória maiores, mas exigem programação mais sofisticada, e que contudo só se justificam quando a rede é excepcionalmente grande.

APÊNDICE C

Neste apêndice serão mostrados os algoritmos básicos para a determinação das características $F(V)$ - tração e regeneração, a partir das curvas de saturação e rendimento do motor.

C.1 - CURVAS DE SATURAÇÃO E RENDIMENTO DO MOTOR

A curva que mostra a relação entre a tensão nos terminais e a corrente de campo, quando a máquina C.C. estiver alimentando uma determinada corrente de carga, é chamada curva de saturação com carga.

A figura C.1 mostra as curvas de saturação com carga de um motor G.E. 729, 1500 volts C.C., para valores graduados de campo.

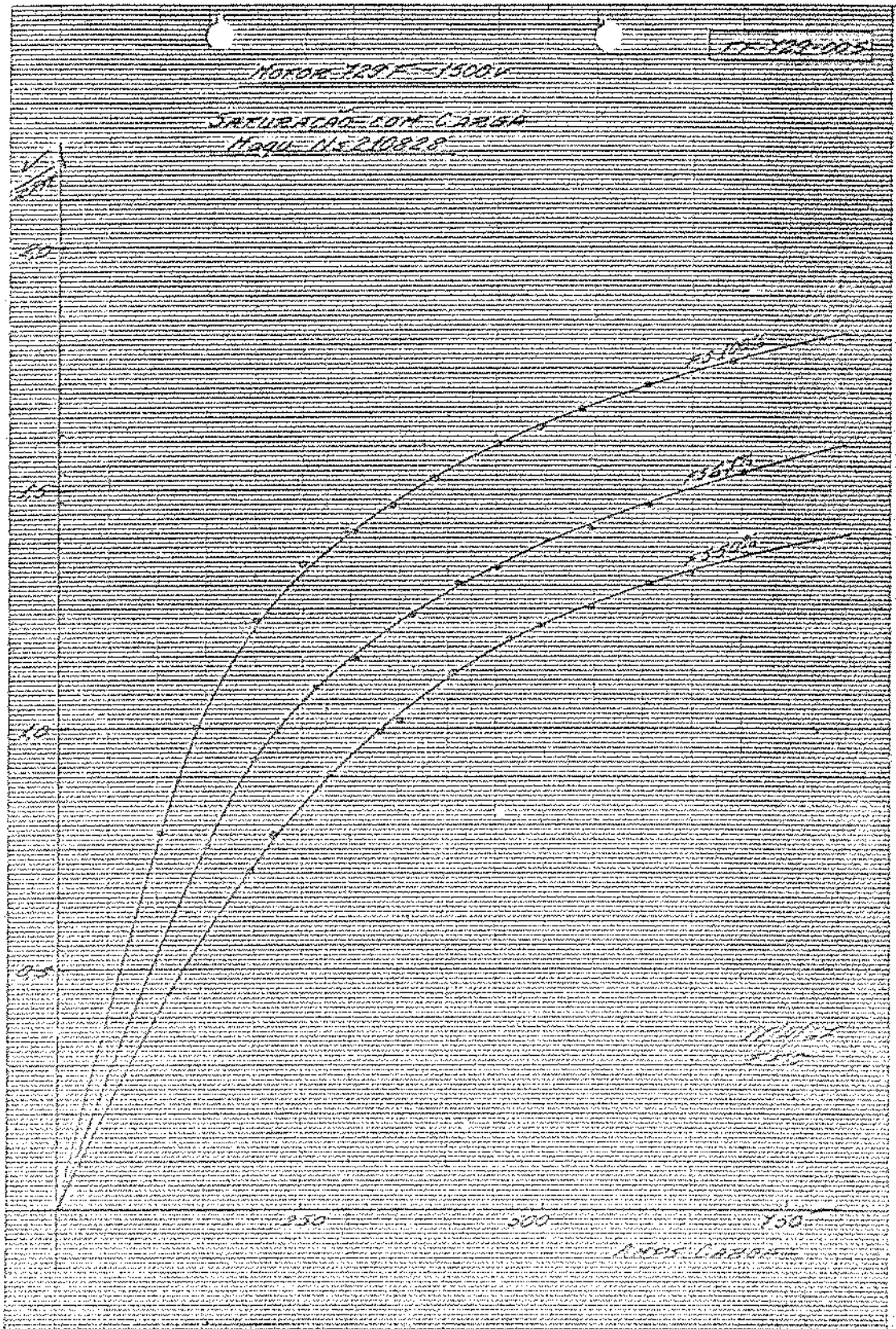


Figura C.1

Dividem-se as perdas principais de energia na maquinaria de corrente contínua em perdas no cobre, no ferro e por atrito, subdivididos como segue (6).

- Perdas no cobre:

- perdas nos enrolamentos de campo paralelo
- perdas nos enrolamentos de campo série
- perdas nos enrolamentos do induzido

- Perdas no ferro:

- perdas por histerese
- perdas por correntes parasitas

- Perdas por atrito:

- perdas por atrito das escovas
- perdas por atrito nos mancais
- perdas pela resistência oposta pelo ar em movimento

O rendimento (η) das máquinas C.C., semelhante ao de transformadores ou de qualquer dispositivo de transformação de energia, é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{\text{perdas}}{\text{entrada}} \quad (\text{C.1})$$

O rendimento obtido através das perdas tem a vantagem de conveniência e economia, além de produzir valores mais exatos e precisos do rendimento, pois um dado erro percentual na medição de perdas produz apenas cerca de um décimo deste erro percentual no rendimento. Os rendimentos determinados por medições de perdas podem ser usados para comparar máquinas competitivas, pois são usados em cada caso exatamente os métodos de medição e cálculo.

A figura C.2 mostra as curvas de rendimento do mesmo motor G.E. 729, 1500 volts C.C., para os mesmos valores de campo em paralelo.

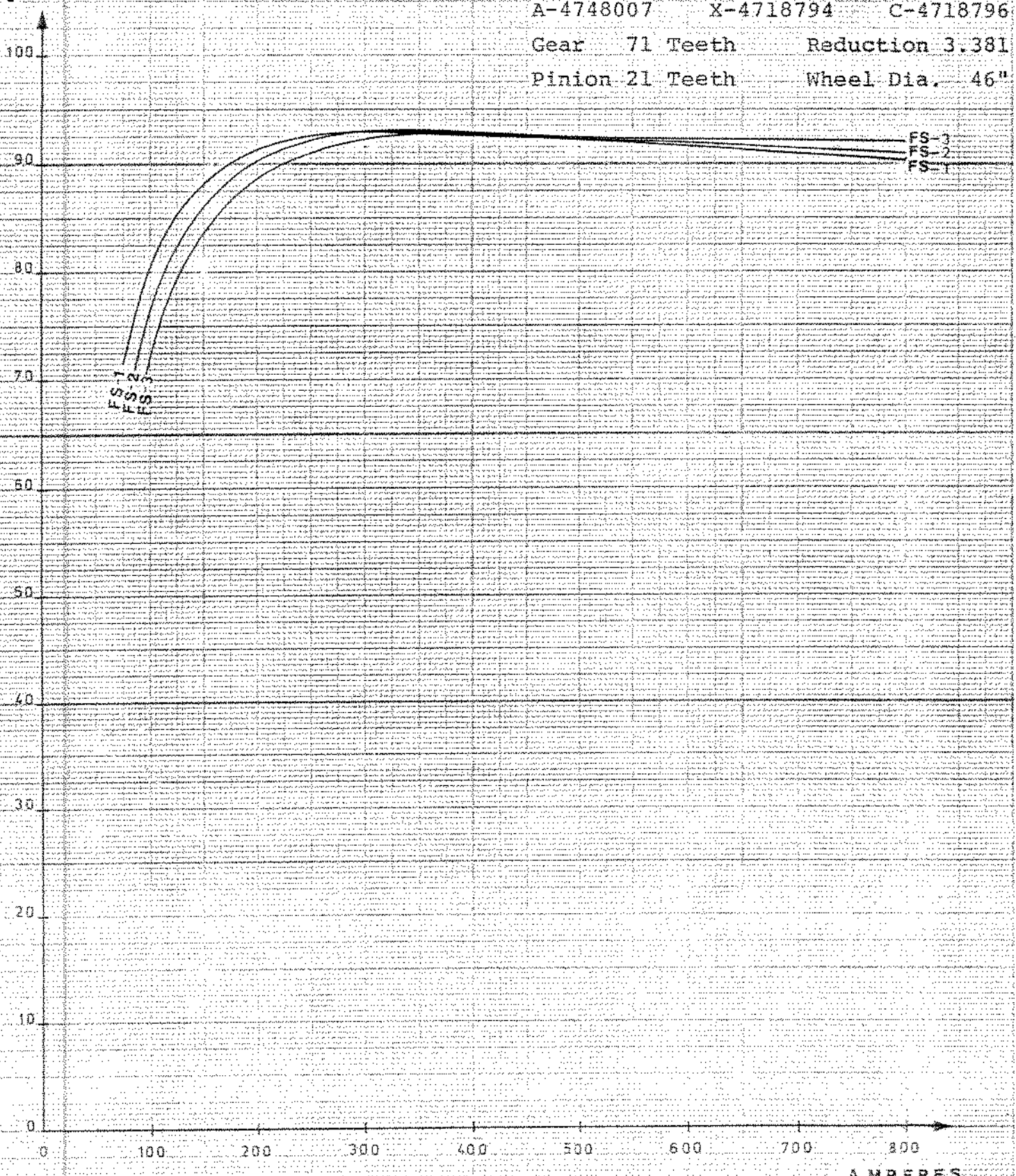
% EFFICIENCY

GE-729 1500/3000 VOLT RAILWAY MOTOR
CHARACTERISTIC CURVES ON 1500 VOLTS

A-4748007 X-4718794 C-4718796

Gear 71 Teeth Reduction 3.381

Pinion 21 Teeth Wheel Dia. 46"



B-H3384268

Figura C.2

C.2 - RELAÇÕES ENTRE CORRENTE, ESFORÇO TRATOR, VELOCIDADE E ESFORÇO DE FRENAGEM

i) A velocidade de uma roda pode ser dada por :

$$V = \pi \cdot D \cdot \left(\frac{N}{60} \right) \quad (C.2)$$

onde D = diâmetro da roda

N = rotações por minuto

ii) Usando-se a relação entre a rotação da roda e a rotação do motor, dada por :

$$\begin{matrix} N & = & N & \times & R_T \\ \text{(motor)} & & \text{(roda)} \end{matrix} \quad (C.3)$$

onde R_T = relação de transmissão

$$V = \frac{\pi \cdot D}{60} \left(\frac{N_{\text{motor}}}{R_T} \right) \quad (C.4)$$

Como é usual em ferrovia $V(\text{km/h})$ e $D(\text{poleg.})$, a relação (C.4) pode ser reescrita:

$$\frac{N_{\text{motor}}}{V} \cong 209 \cdot \frac{R_T}{D} \quad (C.5)$$

iii) Das relações fundamentais (2.2) e (2.3)

$$C = K_0 \frac{E}{N} I \quad (C.6)$$

onde $K_0 = K_1 \cdot K_2^{-1}$

que fornece o valor do conjugado no eixo do motor de tração.

O conjugado real na roda fica então dado por:

$$C = K_0 \cdot R_T \cdot \frac{E}{N} \cdot I \cdot n \quad (C.7)$$

onde η - fator que leva em conta as perdas de conjugado na transmissão.

iv) Da expressão geral do conjugado para o sistema MKS :

$$C \cong 0,9773 \cdot \frac{E}{N} \cdot I \quad (C.8)$$

Igualando-se à expressão (C.7) :

$$C \cong 0,9773 \cdot R_T \cdot \frac{E}{N} \cdot I \cdot \eta \quad (C.9)$$

$$\text{Dimensionalmente } C = \text{Kg} \times \text{m} = ET \cdot \frac{D}{2}$$

Transformando-se D em polegadas, o valor do Esforço Trator (ET) :

$$ET \cong 76,7 \cdot \frac{R_T}{D} \cdot \frac{E}{N} \cdot I \cdot \eta \quad (\text{Kg}) \quad (C.10)$$

v) Para o esforço de frenagem, a relação (C.5) é reescrita como:

$$\frac{R_T}{D} = \frac{1}{209} \cdot \frac{N_{\text{motor}}}{V} \quad (C.11)$$

e substituindo-se na relação (C.10), obtém-se a expressão para o esforço resistente de frenagem:

$$EF \cong 0,367 \cdot \frac{E}{N} \cdot I \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (\text{Kg}) \quad (C.12)$$

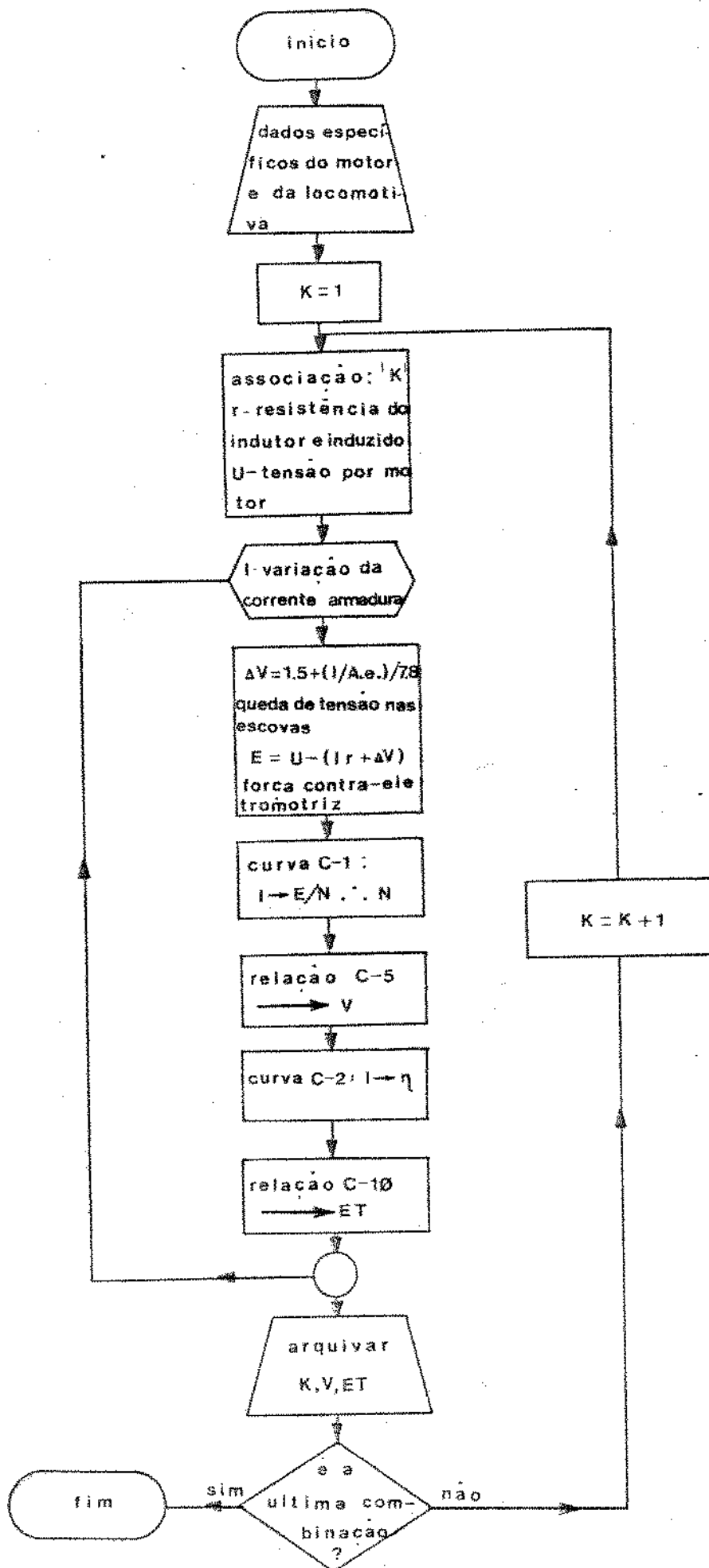


Figura C.3

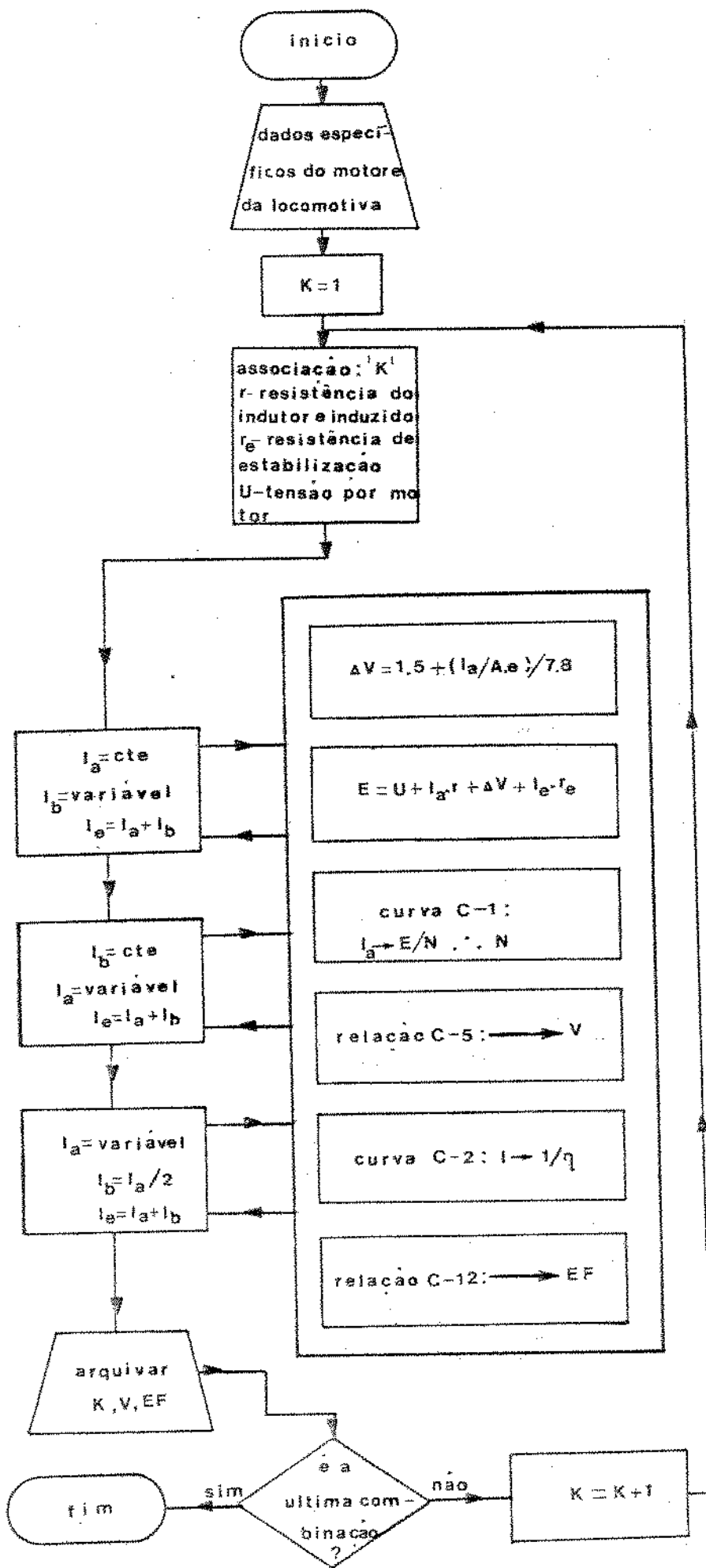


Figura C.4

C.4 - GRÁFICOS DAS FUNÇÕES CARACTERÍSTICAS F(V) DA LOCOMOTIVA

Com os valores determinados pelos algoritmos do item anterior, e usando-se o método de regressão não-linear desenvolvido no Apêndice A, obtem-se funções características $F(V)$ da locomotiva.

Seguem-se os gráficos das funções características da locomotiva elétrica G.E. de 5130 HP - 144 toneladas, tipo C.C., 3000 volts C.C., usados neste trabalho.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOCOMOTIVAS

TRAÇÃO

EQUIPAMENTO: MOTORES DE TRAÇÃO GE-122, 1500/3000 volts

TENSÃO DE LINHA 3000 volts

REDUÇÃO 71/21 DIÂMETRO-RODAS 46"

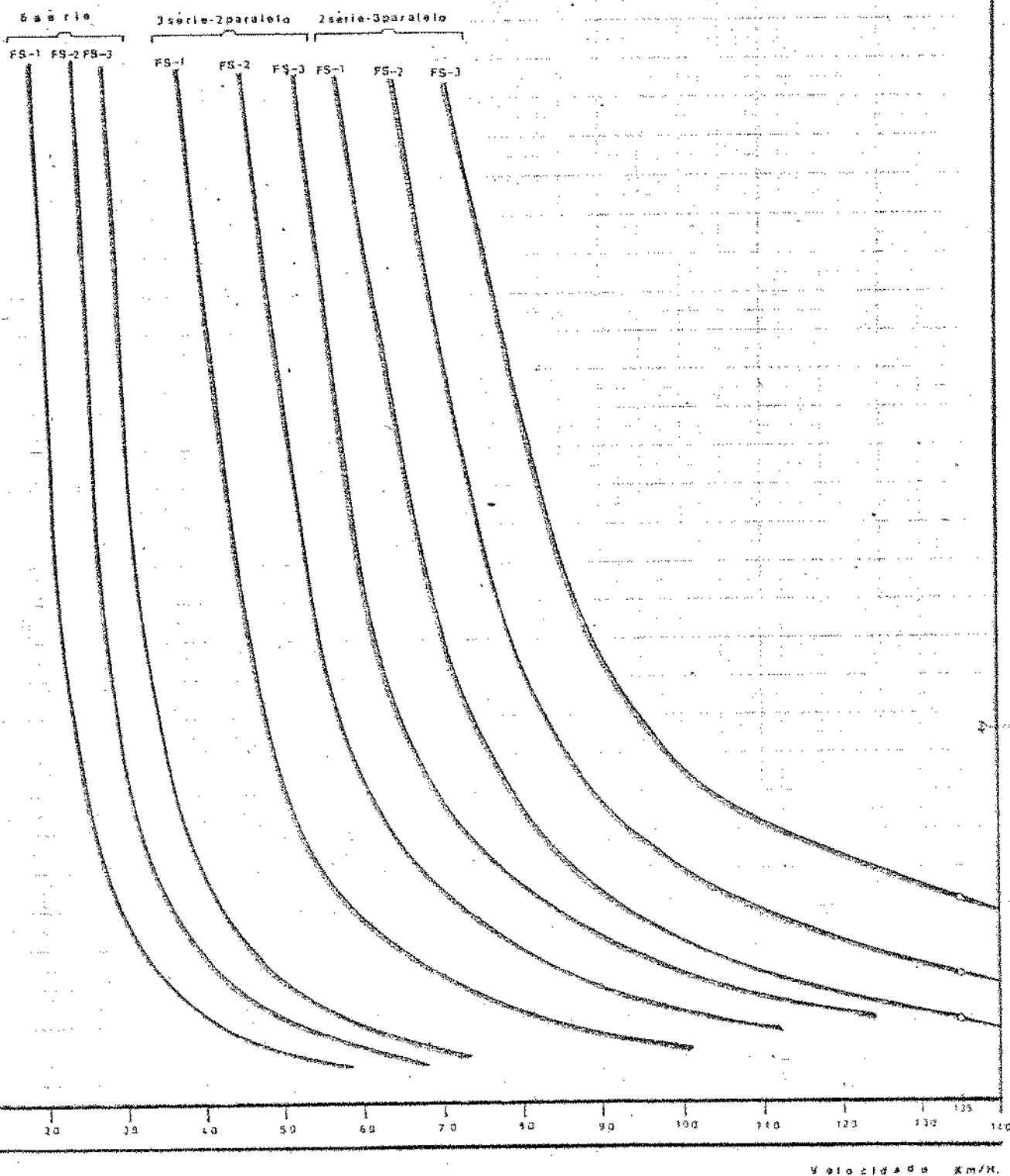


Figura C.5

Esforço de frenagem 10' x Kg

30

25

20

15

10

5

0

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOCOMOTIVAS

FRENAGEM REGENERATIVA

EQUIPAMENTO: MOTORES DE TRACÇÃO GE-723 1500/3000 volts

TENSÃO DE LINHA 3000 volts

REDUÇÃO 71/21 DIAMETRO-RODAS 16"

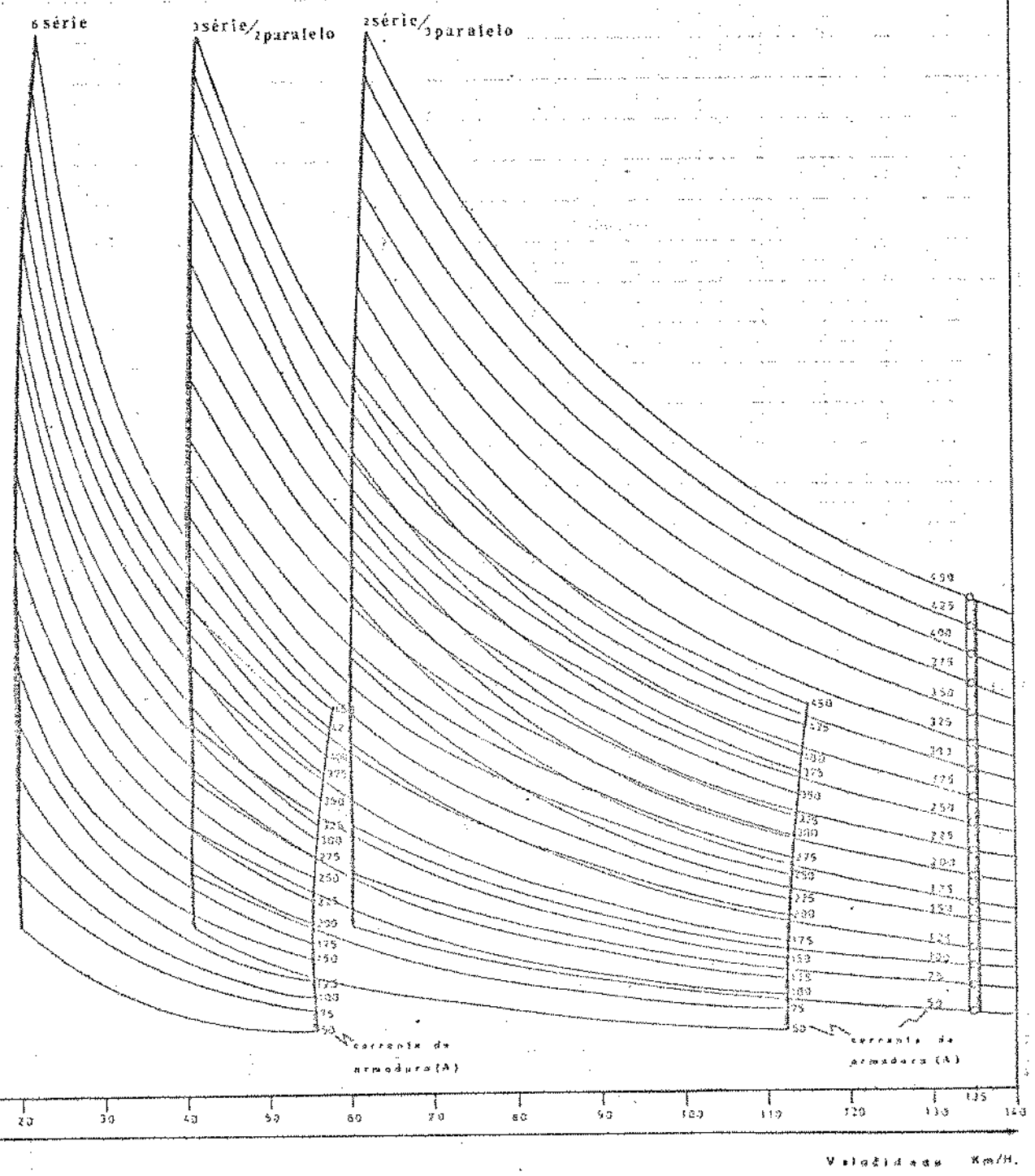


Figura C.6

APÊNDICE D

Neste Apêndice serão mostrados os resultados da simulação do desempenho básico do movimento de um trem.

D.1 - DADOS DE COMPOSIÇÃO

O trem utilizado será o mesmo definido no capítulo VI, ou seja:

DADOS DA COMPOSIÇÃO :

PESO = 642,00 TON

COMPRIMENTO = 288,00 M

NUMERO DE LOCOMOTIVAS 12

PESO 7 UNIDADE 144,00 TON

NUMERO EIXOS 84 AREA FRONTAL 17,0 M2

NUMERO VAGÕES 92

PESO 7 UNIDADE 56,0 TON

NUMERO EIXOS 42 AREA FRONTAL 12,0 M2

CARACTERISTICAS DO ELEMENTO TRATOR :

TIPO	VMIN	VMAX	A0	A1	ET PARTIDA
65F81	19,09	55,34	197384,27733333	-2,1282338	19500,00000000
65F82	22,78	61,21	197347,22800000	-2,1042338	16500,00000000
65F83	26,49	65,21	119285,77333333	-2,2743582	14500,00000000
352P4	39,53	86,25	268281,91800000	-2,2846038	14500,00000000
352P2	47,07	100,75	321393,64000000	-2,0511740	16500,00000000
352P1	54,02	113,04	421935,11200000	-2,1174088	14500,00000000
253P1	68,09	106,36	514850,79000000	-2,2529026	19500,00000000
253P2	71,37	129,24	357781,74000000	-2,0169790	16500,00000000
253P3	81,85	133,44	148542,71000000	-2,1827248	14500,00000000
0,000	0,00	0,00	0,00000000	0,0000000	0,00000000
65F84	20,49	82,86	7346,21000000	-2,2296600	0,00000000
65F85	20,79	82,49	11646,27733333	-2,2295000	0,00000000
65F86	20,90	82,07	16295,17733333	-2,2293600	0,00000000
652P0	21,01	83,35	26768,31200000	-2,2292100	0,00000000
652P4	21,12	83,77	25812,28100000	-2,2290600	0,00000000
652P2	21,27	84,20	38805,11200000	-2,2289100	0,00000000
652P1	21,33	84,61	35941,28000000	-2,2287700	0,00000000
654P0	21,41	85,06	41162,17100000	-2,2286300	0,00000000
654P4	21,55	85,49	40456,32700000	-2,2284900	0,00000000
0,000	0,00	0,00	0,00000000	0,0000000	0,00000000
65F87	41,32	112,84	7358,77333333	-2,0149000	0,00000000
65F88	41,45	113,17	11666,76000000	-2,0147500	0,00000000
65F89	41,57	113,57	16173,31600000	-2,0146100	0,00000000
652P5	41,72	113,86	28745,92100000	-2,0144700	0,00000000
652P3	41,82	114,19	25854,78100000	-2,0143300	0,00000000
65F90	41,94	114,51	30857,64200000	-2,0141900	0,00000000
65F91	42,07	114,88	35949,91000000	-2,0140500	0,00000000
65F92	42,19	115,22	41231,54700000	-2,0139100	0,00000000
65F93	42,32	115,56	46513,41900000	-2,0137700	0,00000000
0,000	0,00	0,00	0,00000000	0,0000000	0,00000000
65F94	61,79	132,68	7349,74000000	-2,2897420	0,00000000
65F95	61,92	133,05	11551,52000000	-2,2896000	0,00000000
65F96	62,01	131,21	16183,24000000	-2,2894600	0,00000000
65F97	62,17	131,47	28778,67500000	-2,2893200	0,00000000
65F98	62,29	131,74	25822,92300000	-2,2891800	0,00000000
65F99	62,42	132,07	30870,77900000	-2,2890400	0,00000000
65F00	62,51	132,16	35957,18800000	-2,2889000	0,00000000
65F01	62,60	132,57	41142,54000000	-2,2887600	0,00000000
65F02	62,79	132,74	46556,41500000	-2,2886200	0,00000000
0,000	0,00	0,00	0,00000000	0,0000000	0,00000000

Figura D.1

D.2 - DADOS DE PERFIL

O perfil será o mesmo que o especificado no Capítulo VI, conforme mostram os resultados:

SENTEIRO DA VIAGEM TOA				
DISTANCIA A SER PERCORRIDA 173.92 KM				
KILOMETRO INICIAL 1.92				
ESTACAO OU MARCO		KM	ALTITUDE M	
J O N H U J P A U L I N T A		1.92	706.45	
TRECHO 1				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
1.92	5.20	706.45	710.35	92.00
CURVAS				
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM/H
1499.10	12.22	22.22	92.00	2.50
189.140	31.22	31.22	88.00	3.22
169.220	30.22	48.22	92.00	3.50
129.220	31.22	22.22	92.00	4.22
129.140	31.22	35.22	92.00	4.50
ESTACAO OU MARCO		KM	ALTITUDE M	
M O R T O		5.20	710.35	
TRECHO 2				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
5.20	19.14	710.35	725.50	92.00
CURVAS				
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM/H
189.220	51.22	16.22	92.00	5.22
179.220	12.22	4.22	92.00	5.90
139.220	26.22	6.22	92.00	6.22
179.120	32.22	55.22	92.00	6.52
189.120	38.22	21.22	92.00	7.50
149.220	26.22	59.22	92.00	7.90
649.220	19.22	44.22	92.00	8.22
139.180	31.22	31.22	92.00	8.50
199.220	35.22	18.22	92.00	8.90
199.180	45.22	4.22	92.00	9.10
104.220	62.22	10.22	85.00	9.90
145.220	52.22	52.22	85.00	10.20
ESTACAO OU MARCO		KM	ALTITUDE M	
C U R R U P I R A		19.14	725.50	
TRECHO 3				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
19.14	15.22	725.50	667.67	92.00
CURVAS				
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM/H
189.220	12.22	12.22	92.00	10.60
613.220	11.22	8.22	92.00	10.90
189.220	22.22	13.22	92.00	11.22
129.220	46.22	54.22	92.00	11.50
109.220	61.22	44.22	92.00	12.30
171.220	63.22	26.22	92.00	12.10
169.220	49.22	38.22	92.00	12.90
179.220	31.22	42.22	92.00	14.20
179.220	34.22	18.22	92.00	14.80
1159.220	1.22	15.22	92.00	14.90

Figura D.2

Figura D.3.a

ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
L O U V E I R A			15,20	667,57
TRECHO 4				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
15,20	17,00	667,57	677,35	92,00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
130,00	42,00	1,00	92,00	16,70
100,00	50,00	1,10	92,00	16,90
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
K I L O M E T R O 1 7			17,00	677,35
TRECHO 5				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
17,00	20,50	677,35	734,74	92,00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
630,00	18,00	2,00	92,00	17,50
450,00	51,00	4,00	92,00	18,10
3100,00	11,00	44,00	92,00	19,10
350,00	73,00	37,00	92,00	19,70
610,00	9,00	1,00	92,00	20,10
310,00	71,00	24,00	92,00	20,40
820,00	18,00	24,00	92,00	20,50
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
K I L O M E T R O 2 0 5			20,50	734,74
TRECHO 6				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
20,50	23,00	734,74	782,50	92,00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
381,00	18,00	5,00	92,00	22,10
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
V I N H E D O			23,00	782,50
TRECHO 7				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
23,00	32,70	782,50	660,00	92,00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
625,00	47,00	49,00	92,00	23,20
397,00	92,00	1,00	92,00	24,10
625,00	31,00	25,00	92,00	25,20
700,00	12,00	30,00	92,00	25,70
1100,00	25,00	30,00	92,00	26,80
1200,00	6,00	50,00	92,00	28,00
640,00	8,00	37,00	92,00	28,80
160,00	51,00	11,00	85,00	29,00
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
V A L I N H O S			32,70	660,00
TRECHO 8				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE
32,70	34,00	660,00	658,00	92,00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
382,00	50,00	47,00	92,00	34,20
580,00	22,00	47,00	92,00	34,70
150,00	18,00	20,00	92,00	35,20
1100,00	1,00	51,00	92,00	36,20
1100,00	19,00	40,00	92,00	37,00
600,00	17,00	10,00	92,00	37,20
140,00	43,00	47,00	92,00	37,70

Figura D.3.b

ESTACAO OU MARCO				KM	ALTITUDE M
K I L O M E T R O 3 4				34,38	658,68
TRECHO 9					
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE	
34200	39,38	658,68	724,28	98,00	
CURVAS					
RATIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM2	
417,13	31,00	23,00	93,00	34,60	
129,76	38,00	11,00	93,00	34,30	
189,130	41,00	18,00	92,00	35,10	
130,142	63,00	19,00	85,00	35,90	
345,370	7,00	70,00	90,00	36,10	
1197,228	8,00	40,00	93,00	36,50	
320,190	7,00	46,00	92,00	36,80	
358,340	17,00	41,00	93,00	37,00	
404,248	11,00	57,00	90,00	37,30	
177,500	25,00	1,00	92,00	37,90	
154,151	12,00	37,00	90,00	38,10	
119,328	32,00	30,00	90,00	38,50	
190,178	12,00	27,00	90,00	39,10	
ESTACAO OU MARCO				KM	ALTITUDE M
K I L O M E T R O 3 9 3 8				39,38	724,28
TRECHO 10					
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE	
39230	44,38	724,28	693,48	98,00	
CURVAS					
RATIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM2	
354,245	113,00	11,00	85,00	39,90	
399,278	63,00	25,00	75,00	40,50	
373,371	51,00	41,00	90,00	41,50	
354,245	20,00	17,00	90,00	41,80	
390,170	57,00	42,00	90,00	42,30	
441,230	57,00	32,00	90,00	42,80	
161,291	39,00	14,00	90,00	43,30	
300,200	5,00	0,00	90,00	43,70	
300,300	5,00	0,00	90,00	43,80	
ESTACAO OU MARCO				KM	ALTITUDE M
C A M P I N A S				44,00	693,48
TRECHO 11					
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE	
44200	52,54	693,48	610,00	98,00	
CURVAS					
RATIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM2	
300,200	43,00	17,00	90,00	47,80	
1140,170	32,00	20,00	90,00	49,50	
ESTACAO OU MARCO				KM	ALTITUDE M
B O A V I S T A				52,54	630,20
TRECHO 12					
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL. TRE	
52,54	67,00	610,00	560,00	98,00	
CURVAS					
RATIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM2	
1140,140	40,00	0,00	90,00	53,50	
120,100	70,00	0,00	90,00	55,00	
1117,70	20,00	23,00	90,00	57,00	
1122,70	11,00	40,00	90,00	58,30	
1115,70	21,00	15,00	90,00	60,00	
1140,10	51,00	0,00	90,00	61,00	

Figura D.3.c

ESTACAO OU MARCO					KM	ALTITUDE M
H O R T O L A N D I A					62,62	544,60
TRECHO 13						
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE		
42,62	62,62	544,60	544,60	95,00		
CURVAS						
RAIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM		
1329,23	48,00	19,00	95,00	63,00		
ESTACAO OU MARCO					KM	ALTITUDE M
S U M A R E					62,62	544,60
TRECHO 14						
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE		
62,62	75,62	544,60	541,57	95,00		
CURVAS						
RAIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM		
2191,08	23,00	52,00	95,00	73,00		
3137,75	31,00	25,00	95,00	74,00		
ESTACAO OU MARCO					KM	ALTITUDE M
N O V A O D E S S A					75,62	541,57
TRECHO 15						
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE		
75,62	82,00	541,57	530,00	92,00		
CURVAS						
RAIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM		
3137,75	12,00	61,00	92,00	79,00		
1145,93	32,00	39,00	92,00	80,00		
1145,93	51,00	21,00	92,00	81,00		
ESTACAO OU MARCO					KM	ALTITUDE M
A M E R I C A N A					82,00	539,00
TRECHO 16						
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE		
82,00	87,64	539,00	531,00	92,00		
CURVAS						
RAIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM		
2264,00	9,00	50,00	92,00	82,50		
2464,00	37,00	51,00	92,00	83,00		
2464,00	19,00	37,00	92,00	85,00		
1637,00	64,00	22,00	92,00	87,00		
ESTACAO OU MARCO					KM	ALTITUDE M
S A O J E P O N T I M O					87,64	533,00
TRECHO 17						
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE		
87,64	93,00	533,00	514,00	78,00		
CURVAS						
RAIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM		
1112,41	37,00	71,00	78,00	80,00		
1112,41	25,00	6,00	78,00	80,00		
1112,41	21,00	6,00	78,00	80,00		

Figura D.3.d

ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE M	
T A T U		97,28		514,28	
TRECHO 18					
KM INICIO	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VELOC. KM	
93,280	100,78	514,28	513,28	90,28	
CURVAS					
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM	
1037,280	17,28	32,28	90,28	94,28	
1037,280	32,28	62,28	90,28	95,28	
1143,283	71,28	92,28	90,28	97,28	
1143,283	47,28	82,28	90,28	98,28	
2191,284	39,28	70,28	90,28	100,28	
ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE M	
I Z A I P U		100,78		533,280	
TRECHO 19					
KM INICIO	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VELOC. KM	
100,288	105,288	533,280	542,66	90,280	
CURVAS					
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM	
2137,275	15,28	50,28	90,28	103,280	
ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE M	
L I M E Y R A		105,48		542,66	
TRECHO 20					
KM INICIO	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VELOC. KM	
105,288	111,288	542,66	565,288	90,288	
CURVAS					
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM	
3137,275	12,28	40,28	90,28	105,280	
1102,282	30,28	50,28	90,28	107,280	
ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE M	
I B I C A B A		111,28		565,288	
TRECHO 21					
KM INICIO	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VELOC. KM	
111,288	116,288	565,288	633,288	90,288	
CURVAS					
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM	
3137,275	71,28	70,28	90,28	111,280	
1037,280	48,28	10,28	90,28	115,280	
1037,280	20,28	8,28	90,28	116,280	
ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE M	
C O R R E I P O P O L I S		116,28		633,288	
TRECHO 22					
KM INICIO	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VELOC. KM	
116,288	126,288	633,288	574,288	90,288	
CURVAS					
RADIO (M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM	
3112,172	71,28	51,28	90,28	110,280	
2191,284	77,28	32,28	90,28	120,280	
2191,284	10,28	40,28	90,28	121,280	

Figura D.3.e

ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
S T A G E R T R U D E S			126,00	574,00
TRECHO 23				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE
120,00	133,84	574,00	613,46	90,00
CURVAS				
RADIO(M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM
2191,04	23,70	74,00	90,00	120,40
2191,04	12,70	74,00	90,00	131,00
1145,93	53,70	0,00	90,00	132,00
2191,04	51,70	19,70	90,00	133,50
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
R I O C L A R O			133,84	613,46
TRECHO 24				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE
133,84	143,27	613,46	552,84	90,00
CURVAS				
RADIO(M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM
1122,22	22,70	30,00	90,00	135,50
1145,93	49,70	0,00	90,00	136,50
1145,93	37,70	0,00	90,00	137,50
1145,93	45,70	21,00	90,00	138,50
1145,93	69,70	30,00	90,00	140,50
1175,11	39,70	50,00	90,00	141,50
1145,93	48,70	0,00	90,00	142,00
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
B A T O V I			143,28	552,84
TRECHO 25				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE
143,28	148,78	552,84	610,00	90,00
CURVAS				
RADIO(M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM
1145,93	53,70	0,00	90,00	144,00
1145,93	72,70	0,00	90,00	146,20
1145,93	32,70	0,00	90,00	147,50
ESTACAO OU MARCO			KM	ALTITUDE M
C A H A O U R			148,78	610,00
TRECHO 26				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE
148,78	154,50	610,00	501,00	90,00
CURVAS				
RADIO(M)	GRAUS	MINUTOS	VELOC.	KM
1145,93	81,70	45,00	90,00	149,00
1115,93	37,70	0,00	90,00	151,00
1115,93	18,70	10,00	90,00	152,00
1145,93	45,70	10,00	90,00	153,50
1145,93	28,70	70,00	90,00	154,50
1115,93	29,70	0,00	90,00	155,00

Figura D.3.f

ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE
				M
I T A P E		156.60		594.00
TRECHO 27				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE
150.20	162.50	594.00	614.20	90.00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
1145.93	36.00	02.00	90.00	157.20
1145.93	36.00	02.00	90.00	158.00
1145.93	84.00	02.00	90.00	159.50
1145.93	86.00	32.00	90.00	161.50
ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE
				M
G R A U N A		162.50		614.20
TRECHO 28				
KM INIC	KM FIN	ALT INI	ALT FIN	VEL TRE
162.50	174.20	614.20	763.22	90.00
CURVAS				
RAIO (M)	GRaus	MINUTOS	VELOC.	KM
1145.93	32.00	20.00	90.00	163.20
1145.93	65.00	22.00	90.00	164.22
ESTACAO OU MARCO		KM		ALTITUDE
				M
I T I N A P I N A		174.20		763.22
***** SIMULADA *****				

D.3 - DESEMPENHO BÁSICO DO MOVIMENTO DO TREM

As figuras a seguir mostram o desempenho básico do trem padrão, movimentando-se no sentido importação (ida) e exportação (volta):

importação:

ESTACAO OU MARCO	V.INICIAL	V.FINAL	F.INICIAL	F.FINAL	TEMPO	KM.	SHUNT
JUNO-PAULISTA	0,00	52,42	0,00	19580,00	0,00	1,499	1
	52,42	68,42	19580,00	6300,00	0,00	1,997	5
	68,42	84,32	6300,00	5172,57	0,00	2,496	7
	84,32	71,17	5172,57	8227,96	0,00	2,994	6
	71,17	74,57	8227,96	7712,98	0,00	3,493	6
	74,57	76,52	7712,98	6184,48	0,00	3,991	6
	76,52	77,82	6184,48	6147,42	0,00	4,490	6
	77,82	79,52	6147,42	7489,38	0,00	4,988	7
	79,52	81,32	7489,38	6118,14	0,00	5,487	7
	81,32	84,72	6118,14	11216,72	0,00	5,986	8
MORTO	84,72	89,02	11216,72	9197,13	0,00	6,484	8
	89,02	90,02	9197,13	3427,63	0,00	6,983	6
	90,02	90,02	3427,63	6451,89	0,00	7,481	7
	90,02	90,02	6451,89	6451,89	0,00	7,980	7
	90,02	90,02	6451,89	8088,84	0,00	8,478	8
	90,02	81,44	8088,84	8,00	0,00	8,977	9
	81,44	78,17	8,00	11132,18	0,00	9,476	8
	78,17	81,57	11132,18	12377,67	0,00	9,974	8
	81,57	84,47	12377,67	11118,99	0,00	10,473	8
	84,47	86,87	11118,99	10174,71	0,00	10,971	8
CORRUPIRA	86,87	89,97	10174,71	4187,17	0,00	11,470	8
	89,97	90,00	4187,17	-61,81	0,00	11,968	21
	90,00	90,00	-61,81	120,39	0,00	12,467	5
	90,00	90,00	120,39	-727,20	0,00	12,965	21
	90,00	90,00	-727,20	-764,48	0,00	13,464	21
	90,00	90,00	-764,48	-827,19	0,00	13,963	21
	90,00	90,00	-827,19	-482,57	0,00	14,461	21
	90,00	90,00	-482,57	-1128,68	0,00	14,960	21
	90,00	90,00	-1128,68	-1451,74	0,00	15,458	21
	90,00	90,00	-1451,74	1585,00	0,00	15,957	5
LOMUEIRA	90,00	90,00	1585,00	6452,81	0,00	16,455	7
	90,00	90,00	6452,81	8725,79	0,00	16,954	8
	90,00	90,00	8725,79	10091,84	0,00	17,452	8
	90,00	90,00	10091,84	12269,32	0,00	17,951	9
	90,00	74,80	12269,32	0,00	0,00	18,450	9
	74,80	67,11	0,00	17035,30	0,00	18,948	9
	67,11	70,31	17035,30	18764,59	0,00	19,447	8
	70,31	71,61	18764,59	19995,28	0,00	19,945	9
	71,61	75,91	19995,28	19789,63	0,00	20,444	9
	75,91	77,41	19789,63	18029,50	0,00	20,942	8
KILOMETRO 17	77,41	78,91	18029,50	13656,54	0,00	21,441	9
	78,91	80,51	13656,54	5761,46	0,00	21,939	6
	80,51	82,01	5761,46	2779,76	0,00	22,438	5
	82,01	83,31	2779,76	8,83	0,00	22,937	1
	83,31	84,41	8,83	7,73	0,00	23,435	1
	84,41	85,41	7,73	6,85	0,00	23,934	1
	85,41	86,31	6,85	2789,70	0,00	24,433	5
	86,31	88,01	2789,70	4337,20	0,00	24,931	6
	88,01	90,00	4337,20	804,87	0,00	25,429	5
	90,00	90,00	804,87	2784,10	0,00	25,928	5
VINHEDO	90,00	90,00	2784,10	2961,35	0,00	26,427	6
	90,00	90,00	2961,35	2819,82	0,00	26,925	5
	90,00	90,00	2819,82	2749,85	0,00	27,424	5
	90,00	90,00	2749,85	2036,53	0,00	27,922	5
	90,00	87,29	2036,53	0,00	0,00	28,421	0
	87,29	84,49	0,00	0,00	0,00	28,919	0
	84,49	85,00	0,00	4439,64	0,00	29,418	6
	85,00	86,00	4439,64	4680,48	0,00	29,916	6
	86,00	87,50	4680,48	4421,77	0,00	30,415	6
	87,50	90,00	4421,77	2656,96	0,00	30,914	5
VAGINHOS	90,00	90,00	2656,96	4626,28	0,00	31,412	7
	90,00	90,00	4626,28	5624,53	0,00	31,911	7
	90,00	90,00	5624,53	6452,93	0,00	32,409	8
	90,00	90,00	6452,93	6561,62	0,00	32,908	7
	90,00	90,00	6561,62	6951,17	0,00	33,406	8
	90,00	90,00	6951,17	7097,46	0,00	33,905	8
	90,00	90,00	7097,46	7268,76	0,00	34,403	8
	90,00	80,76	7268,76	0,00	0,00	34,902	0
	80,76	77,34	0,00	15162,09	0,00	35,401	9
	77,34	80,44	15162,09	16609,49	0,00	35,900	9
KILOMETRO 34	80,44	81,96	16609,49	15247,49	0,00	36,399	9
	81,96	81,30	15247,49	14576,21	0,00	36,896	9
	81,30	83,44	14576,21	14914,89	0,00	37,395	9
	83,44	79,60	14914,89	15298,84	0,00	37,893	9
	79,60	79,85	15298,84	15650,72	0,00	38,392	9
	79,85	80,85	15650,72	16776,81	0,00	38,890	9
	80,85	62,19	16776,81	0,00	0,00	39,389	0
	62,19	54,40	0,00	16235,27	0,00	39,888	7
	54,40	56,52	16235,27	16918,20	0,00	40,386	5
	56,52	59,70	16918,20	9145,30	0,00	40,885	5
KILOMETRO 39,3	59,70	62,02	9145,30	4587,17	0,00	41,383	4
	62,02	63,40	4587,17	4368,83	0,00	41,882	4
	63,40	66,40	4368,83	3567,94	0,00	42,380	4
	66,40	69,70	3567,94	3176,26	0,00	42,879	4
	69,70	69,40	3176,26	2039,32	0,00	43,378	0
	69,40	49,07	2039,32	0,00	0,00	43,876	0
	49,07	0,00	0,00	0,00	0,00	44,375	0
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,874	0
	0,00	59,93	0,00	19520,00	0,00	45,372	1
	59,93	71,13	19520,00	2154,60	0,00	45,870	4
CAMPINAS	71,13	73,63	2154,60	1464,69	0,00	46,369	4
	73,63	76,53	1464,69	1451,71	0,00	46,867	4
	76,53	77,73	1451,71	1771,75	0,00	47,366	4
	77,73	77,93	1771,75	1671,31	0,00	47,865	4
	77,93	78,53	1671,31	1679,02	0,00	48,363	4
	78,53	77,73	1679,02	3119,89	0,00	48,862	5
	77,73	81,53	3119,89	2251,43	0,00	49,360	5
	81,53	87,93	2251,43	2656,04	0,00	49,859	5
	87,93	88,23	2656,04	2495,16	0,00	50,357	5
	88,23	84,93	2495,16	2374,11	0,00	50,856	5
BOA VISTA	84,93	85,63	2374,11	2270,72	0,00	51,355	5
	85,63	86,23	2270,72	2270,72	0,00	51,853	5
	86,23	87,43	2270,72	4364,28	0,00	52,352	6
	87,43	90,00	4364,28	-274,00	0,00	52,850	21
	90,00	90,00	-274,00	2651,67	0,00	53,349	5

Figura D.4.a

MORTOLANDIA

SUMARE

NOVA ODESSA

AMERICANA

SAD JERONIMO

TATU

ITAIPU

LTAKIPA

92.82	92.82	2491.81	1845.85	2717	41.817	5
92.82	92.82	1985.85	1510.30	2718	41.816	5
92.82	92.82	1510.30	1557.82	2718	41.815	5
92.82	92.82	1362.82	1274.94	2719	55.311	5
92.82	92.82	1274.94	1217.25	2719	55.811	5
92.82	92.82	1217.25	1245.17	2723	56.310	5
92.82	92.82	1245.17	1245.11	2728	56.839	5
92.82	92.82	1245.11	1249.59	2728	57.317	5
92.82	92.82	1249.59	1247.17	2771	57.836	5
92.82	92.82	1247.17	1221.26	2777	58.335	5
92.82	92.82	1221.26	1208.20	2782	58.833	5
92.82	92.82	1208.20	1110.77	2790	59.331	5
92.82	92.82	1110.77	1117.46	2794	59.810	5
92.82	92.82	1117.46	1494.40	2799	60.329	5
92.82	92.82	1494.40	1344.77	2805	60.827	5
92.82	92.82	1344.77	1269.96	2813	61.326	5
92.82	92.82	1269.96	0.00	2816	61.824	5
92.82	92.82	0.00	1814.62	2921	62.323	5
92.82	92.82	1814.62	716.82	2927	62.821	5
92.82	92.82	716.82	3901.82	2932	63.320	5
92.82	92.82	3901.82	7461.95	2938	63.818	5
92.82	92.82	7461.95	1162.27	2943	64.317	5
92.82	92.82	1162.27	5482.36	2944	64.816	5
92.82	92.82	5482.36	3595.80	2953	65.314	5
92.82	92.82	3595.80	5842.64	2959	65.813	5
92.82	92.82	5842.64	5741.02	2964	66.311	5
92.82	92.82	5741.02	5765.21	2969	66.810	5
92.82	92.82	5765.21	5777.31	2974	67.308	5
92.82	92.82	5777.31	5783.35	2980	67.807	5
92.82	92.82	5783.35	5786.38	2985	68.305	5
92.82	92.82	5786.38	0.00	2991	68.804	5
92.82	92.82	0.00	0.00	2998	69.303	5
92.82	92.82	0.00	0.00	2916	69.801	5
92.82	92.82	0.00	0.00	2946	70.300	5
92.82	92.82	0.00	19508.80	2985	70.798	5
92.82	92.82	19508.80	5762.42	2993	71.297	5
92.82	92.82	5762.42	5178.63	1.2998	71.795	5
92.82	92.82	5178.63	4883.34	1.2998	72.294	5
92.82	92.82	4883.34	7417.84	1.2913	72.792	5
92.82	92.82	7417.84	6595.40	1.2928	73.291	5
92.82	92.82	6595.40	6113.85	1.2926	73.790	5
92.82	92.82	6113.85	5797.84	1.2912	74.288	5
92.82	92.82	5797.84	5382.17	1.2918	74.787	5
92.82	92.82	5382.17	6480.84	1.2944	75.285	5
92.82	92.82	6480.84	6810.19	1.2958	75.784	5
92.82	92.82	6810.19	10080.35	1.2956	76.282	5
92.82	92.82	10080.35	497.81	1.2962	76.781	5
92.82	92.82	497.81	5271.62	1.2967	77.280	5
92.82	92.82	5271.62	5230.82	1.2973	77.778	5
92.82	92.82	5230.82	5301.90	1.2978	78.277	5
92.82	92.82	5301.90	5254.03	1.2984	78.775	5
92.82	92.82	5254.03	5468.20	1.2989	79.274	5
92.82	92.82	5468.20	5337.18	1.2995	79.772	5
92.82	92.82	5337.18	5509.77	1.2990	80.271	5
92.82	92.82	5509.77	5357.97	1.2996	80.769	5
92.82	92.82	5357.97	0.00	1.2912	81.268	5
92.82	92.82	0.00	0.00	1.2928	81.767	5
92.82	92.82	0.00	0.00	1.2919	82.265	5
92.82	92.82	0.00	0.00	1.2919	82.764	5
92.82	92.82	0.00	19508.80	1.2907	83.262	5
92.82	92.82	19508.80	2773.75	1.2915	83.761	5
92.82	92.82	2773.75	2634.04	1.2921	84.259	5
92.82	92.82	2634.04	2301.37	1.2928	84.758	5
92.82	92.82	2301.37	2390.77	1.2935	85.256	5
92.82	92.82	2390.77	4210.43	1.2942	85.755	5
92.82	92.82	4210.43	3754.86	1.2949	86.254	5
92.82	92.82	3754.86	3444.02	1.2955	86.752	5
92.82	92.82	3444.02	3230.35	1.2961	87.251	5
92.82	92.82	3230.35	3078.85	1.2967	87.749	5
92.82	92.82	3078.85	5552.14	1.2973	88.248	5
92.82	92.82	5552.14	6330.96	1.2979	88.746	5
92.82	92.82	6330.96	10625.97	1.2984	89.245	5
92.82	92.82	10625.97	9405.28	1.2990	89.744	5
92.82	92.82	9405.28	5339.78	1.2996	90.242	5
92.82	92.82	5339.78	7570.13	1.2991	90.741	5
92.82	92.82	7570.13	7458.26	1.2997	91.239	5
92.82	92.82	7458.26	7759.73	1.2912	91.738	5
92.82	92.82	7759.73	7710.46	1.2918	92.236	5
92.82	92.82	7710.46	7645.83	1.2923	92.735	5
92.82	92.82	7645.83	7673.51	1.2929	93.233	5
92.82	92.82	7673.51	7834.83	1.2934	93.732	5
92.82	92.82	7834.83	8020.44	1.2940	94.231	5
92.82	92.82	8020.44	8401.47	1.2945	94.729	5
92.82	92.82	8401.47	8422.31	1.2951	95.228	5
92.82	92.82	8422.31	8670.83	1.2957	95.726	5
92.82	92.82	8670.83	8556.99	1.2962	96.225	5
92.82	92.82	8556.99	8509.97	1.2968	96.723	5
92.82	92.82	8509.97	8471.61	1.2973	97.222	5
92.82	92.82	8471.61	9593.48	1.2979	97.720	5
92.82	92.82	9593.48	9450.32	1.2984	98.219	5
92.82	92.82	9450.32	8525.28	1.2990	98.718	5
92.82	92.82	8525.28	8534.22	1.2995	99.216	5
92.82	92.82	8534.22	8464.64	1.2991	99.715	5
92.82	92.82	8464.64	8465.92	1.2996	100.213	5
92.82	92.82	8465.92	8272.54	1.2912	100.710	5
92.82	92.82	8272.54	7943.84	1.2918	101.208	5
92.82	92.82	7943.84	7854.31	1.2923	101.707	5
92.82	92.82	7854.31	7854.22	1.2929	102.205	5
92.82	92.82	7854.22	7789.70	1.2934	102.704	5
92.82	92.82	7789.70	7757.43	1.2940	103.203	5
92.82	92.82	7757.43	7733.82	1.2945	103.702	5
92.82	92.82	7733.82	0.00	1.2951	104.200	5
92.82	92.82	0.00	0.00	1.2957	104.699	5
92.82	92.82	0.00	0.00	1.2962	105.197	5
92.82	92.82	0.00	0.00	1.2968	105.696	5
92.82	92.82	0.00	19508.80	1.2973	106.194	5
92.82	92.82	19508.80	8273.24	1.2979	106.693	5
92.82	92.82	8273.24	1340.56	1.2984	107.192	5
92.82	92.82	1340.56	4140.66	1.2990	107.691	5

Figura D.4.b

IBICABA

CORDEIROPOLIS

STA GERTHUES

RIO CLARO

BATUVI

CANAQUA

ITAPE

68.38	72.84	9129.66	8559.87	12580	108.190	6
72.88	77.64	8559.87	10428.74	1.587	108.689	7
72.88	75.44	10428.74	9423.04	1.591	109.187	7
73.18	79.34	9423.04	13423.42	1.608	109.686	8
79.18	83.74	13423.42	11427.76	1.606	110.184	8
81.78	86.84	11427.76	10477.67	1.612	110.683	8
84.80	89.44	10477.67	11715.67	1.618	111.182	9
88.82	92.88	13135.42	9444.15	1.623	111.680	9
92.88	96.88	9444.15	13381.82	1.629	112.179	9
96.88	99.88	13381.82	13761.59	1.635	112.677	9
99.88	99.88	13761.59	13994.63	1.640	113.176	9
99.88	99.88	13994.63	14118.09	1.646	113.674	9
99.88	99.88	14118.09	14334.58	1.651	114.173	9
99.88	99.88	14334.58	14280.83	1.657	114.671	9
99.88	99.88	14280.83	14419.47	1.662	115.170	9
99.88	99.88	14419.47	14322.51	1.668	115.669	9
99.88	99.88	14322.51	14274.74	1.673	116.167	9
99.88	99.88	14274.74	14249.88	1.679	116.666	9
99.88	99.88	14249.88	11179.13	1.684	117.164	9
99.88	99.88	11179.13	6656.67	1.690	117.663	7
99.88	99.88	6656.67	4324.82	1.695	118.161	7
99.88	99.88	4324.82	3157.69	1.701	118.660	6
99.88	99.88	3157.69	2574.52	1.707	119.158	5
99.88	99.88	2574.52	2401.99	1.712	119.657	5
99.88	99.88	2401.99	2146.67	1.718	120.156	5
99.88	99.88	2146.67	2094.82	1.723	120.654	5
99.88	99.88	2094.82	2042.69	1.729	121.153	5
99.88	99.88	2042.69	2017.82	1.734	121.651	5
99.88	99.88	2017.82	2123.24	1.740	122.150	5
99.88	99.88	2123.24	2057.49	1.745	122.648	5
99.88	99.88	2057.49	2024.33	1.751	123.147	5
99.88	99.88	2024.33	2097.84	1.756	123.646	5
99.88	99.88	2097.84	1999.69	1.762	124.144	5
99.88	99.88	1999.69	1975.48	1.767	124.643	5
99.88	99.88	1975.48	1971.42	1.773	125.141	5
99.88	99.88	1971.42	1992.39	1.779	125.640	5
99.88	99.88	1992.39	1961.11	1.784	126.138	6
99.88	99.88	1961.11	6919.70	1.790	126.637	8
99.88	99.88	6919.70	8398.82	1.795	127.135	8
99.88	99.88	8398.82	9137.15	1.801	127.634	8
99.88	99.88	9137.15	9625.77	1.806	128.133	8
99.88	99.88	9625.77	9751.81	1.812	128.631	8
99.88	99.88	9751.81	9813.67	1.817	129.130	8
99.88	99.88	9813.67	9846.99	1.823	129.628	8
99.88	99.88	9846.99	9979.69	1.828	130.127	8
99.88	99.88	9979.69	10166.89	1.834	130.625	8
99.88	99.88	10166.89	10021.19	1.840	131.124	8
99.88	99.88	10021.19	10057.82	1.845	131.622	8
99.88	99.88	10057.82	9977.85	1.851	132.121	8
99.88	99.88	9977.85	9924.17	1.856	132.620	8
99.88	99.88	9924.17	0.00	1.863	133.118	8
99.88	99.88	0.00	0.00	1.878	133.617	8
99.88	99.88	0.00	0.00	1.892	134.115	8
99.88	99.88	0.00	19508.00	1.917	134.614	1
99.88	99.88	19508.00	3131.84	1.935	135.112	4
99.88	99.88	3131.84	2974.29	1.961	135.611	4
99.88	99.88	2974.29	2514.24	1.969	136.110	4
99.88	99.88	2514.24	2782.83	1.975	136.608	4
99.88	99.88	2782.83	2098.21	1.982	137.107	4
99.88	99.88	2098.21	1966.94	1.988	137.605	4
99.88	99.88	1966.94	1855.84	1.994	138.104	4
99.88	99.88	1855.84	1757.36	2.001	138.602	4
99.88	99.88	1757.36	3396.15	2.007	139.101	5
99.88	99.88	3396.15	2952.69	2.013	139.599	5
99.88	99.88	2952.69	2720.19	2.019	140.098	5
99.88	99.88	2720.19	2555.07	2.025	140.597	5
99.88	99.88	2555.07	2444.77	2.031	141.095	5
99.88	99.88	2444.77	4642.43	2.037	141.594	6
99.88	99.88	4642.43	4227.67	2.042	142.092	6
99.88	99.88	4227.67	57.79	2.048	142.591	21
99.88	99.88	57.79	2052.57	2.053	143.089	5
99.88	99.88	2052.57	5970.01	2.059	143.588	7
99.88	99.88	5970.01	11361.61	2.064	144.086	9
99.88	99.88	11361.61	14187.48	2.070	144.585	9
99.88	99.88	14187.48	15718.48	2.076	145.084	9
99.88	99.88	15718.48	16283.80	2.081	145.582	9
99.88	99.88	16283.80	16569.50	2.087	146.081	9
99.88	99.88	16569.50	16449.45	2.092	146.579	9
99.88	99.88	16449.45	16981.34	2.098	147.078	9
99.88	99.88	16981.34	17115.35	2.103	147.576	9
99.88	99.88	17115.35	16444.24	2.107	148.075	9
99.88	99.88	16444.24	16918.74	2.113	148.574	9
99.88	99.88	16918.74	13123.08	2.118	149.072	7
99.88	99.88	13123.08	7964.64	2.125	149.571	8
99.88	99.88	7964.64	5784.41	2.131	150.069	7
99.88	99.88	5784.41	1745.05	2.136	150.568	6
99.88	99.88	1745.05	3513.78	2.142	151.066	6
99.88	99.88	3513.78	3259.73	2.148	151.565	6
99.88	99.88	3259.73	3078.42	2.154	152.063	6
99.88	99.88	3078.42	3073.87	2.159	152.562	6
99.88	99.88	3073.87	2050.53	2.164	153.061	5
99.88	99.88	2050.53	2463.48	2.170	153.559	6
99.88	99.88	2463.48	2793.18	2.176	154.058	5
99.88	99.88	2793.18	2942.25	2.181	154.556	6
99.88	99.88	2942.25	2768.75	2.186	155.055	5
99.88	99.88	2768.75	2884.98	2.192	155.554	5
99.88	99.88	2884.98	2884.78	2.197	156.053	5
99.88	99.88	2884.78	2713.71	2.203	156.552	5
99.88	99.88	2713.71	4317.33	2.208	157.051	7
99.88	99.88	4317.33	6557.91	2.214	157.550	7
99.88	99.88	6557.91	7408.11	2.219	158.048	8
99.88	99.88	7408.11	8457.17	2.225	158.547	8
99.88	99.88	8457.17	8608.15	2.231	159.046	8
99.88	99.88	8608.15	8608.15	2.236	159.545	8
99.88	99.88	8608.15	8608.15	2.242	160.044	8
99.88	99.88	8608.15	8608.15	2.247	160.543	8
99.88	99.88	8608.15	8608.15	2.253	161.042	8

Figura D.4.c

GRAUNA	92.22	92.22	8879.29	8824.39	2.253	161.048	8
	92.22	92.22	8824.39	8821.44	2.258	161.516	8
	92.22	92.22	8821.44	8828.07	2.264	162.035	8
	92.22	92.22	8828.07	8483.28	2.269	162.513	8
	92.22	92.22	8981.78	12585.82	2.215	163.032	8
	92.22	92.22	12585.82	12931.94	2.221	163.538	8
	92.22	92.22	12931.94	14187.99	2.226	164.029	8
	92.22	92.22	14187.99	14695.02	2.232	164.527	8
	92.22	92.22	14695.02	14988.54	2.237	165.026	8
	92.22	92.22	14988.54	15135.29	2.243	165.525	8
	92.22	92.22	15135.29	15208.67	2.248	166.023	8
	92.22	92.22	15208.67	15295.36	2.254	166.522	8
	92.22	92.22	15295.36	15263.71	2.259	167.020	8
	92.22	92.22	15263.71	15272.88	2.265	167.519	8
	92.22	92.22	15272.88	15277.46	2.270	168.017	8
	92.22	92.22	15277.46	15279.76	2.276	168.516	8
	92.22	92.22	15279.76	15282.98	2.281	169.014	8
	92.22	92.22	15282.98	15281.48	2.287	169.513	8
	92.22	92.22	15281.48	15281.76	2.293	170.012	8
	92.22	92.22	15281.76	15281.91	2.298	170.510	8
	92.22	92.22	15281.91	15281.98	2.304	171.009	8
	92.22	92.22	15281.98	15282.01	2.309	171.507	8
	92.22	92.22	15282.01	15282.03	2.315	172.006	8
	92.22	92.22	15282.03	15282.06	2.320	172.504	8
	92.22	92.22	15282.06	8.00	2.327	173.003	8
	61.64	9.02	8.00	8.00	2.402	173.502	8
	8.00	9.02	9.02	8.00	2.452	174.000	8
ITIRAPINA							

Figura D.4.d

exportação:

ESTACAO DO MARCO	V.INICIAL	V.FINAL	F.INICIAL	F.FINAL	TEMPO	KM.	SHOOT
ITIRAPINA	00.00	52.42	00.00	19589.00	0.17	173.501	1
	52.42	68.42	19589.00	6188.08	0.27	173.001	5
	68.42	08.32	6188.08	5772.57	0.15	172.503	5
	08.32	74.12	5772.57	9227.46	0.12	172.008	6
	74.12	74.32	9227.46	7732.99	0.19	171.507	6
	74.32	76.52	7732.98	6784.88	0.55	171.009	6
	76.52	77.82	6784.92	6187.47	0.62	170.510	6
	77.82	79.42	6187.47	7609.98	0.68	170.012	7
	79.42	81.32	7609.98	8918.14	0.71	169.513	7
	81.32	84.72	8918.14	11016.72	0.98	169.014	8
	84.72	89.82	11016.72	9197.13	0.96	168.516	8
	89.82	92.88	9197.13	3427.68	0.91	168.017	9
	92.88	98.00	3427.68	6451.89	0.97	167.519	7
	98.00	98.00	6451.89	6451.89	1.02	167.020	7
	98.00	98.00	6451.89	2829.87	1.08	166.522	7
	98.00	98.00	2829.87	-181.34	1.13	166.023	21
	98.00	98.00	-181.34	-1289.53	1.19	165.524	21
	98.00	98.00	-1289.53	-1684.35	1.24	165.026	21
	98.00	98.00	-1684.35	-1767.65	1.30	164.527	21
	98.00	98.00	-1767.65	-1848.88	1.35	164.029	21
	98.00	98.00	-1848.88	-1988.18	1.41	163.530	21
	98.00	98.00	-1988.18	-1899.87	1.47	163.032	21
	98.00	98.00	-1899.87	-1989.71	1.52	162.533	21
	98.00	98.00	-1989.71	-1887.79	1.58	162.035	21
	98.00	98.00	-1887.79	1858.21	2.63	161.536	5
	98.00	98.00	1858.21	2978.91	1.69	161.037	5
	98.00	98.00	2978.91	3781.16	1.74	160.539	6
	98.00	98.00	3781.16	3944.63	1.80	160.040	6
	98.00	98.00	3944.63	4026.22	1.85	159.542	6
	98.00	98.00	4026.22	4867.81	1.91	159.043	6
	98.00	98.00	4867.81	6325.51	1.96	158.545	7
	98.00	98.00	6325.51	4216.66	2.02	158.046	7
	98.00	98.00	4216.66	4400.93	2.08	157.548	7
	98.00	98.00	4400.93	4254.07	2.13	157.049	7
	98.00	98.00	4254.07	4186.94	2.19	156.550	6
ITAPE	98.00	98.00	4186.94	5806.74	2.24	156.052	7
	98.00	98.00	5806.74	8841.91	2.30	155.553	8
	98.00	98.00	8841.91	9400.59	2.35	155.055	8
	98.00	98.00	9400.59	9848.84	2.41	154.556	8
	98.00	98.00	9848.84	10299.06	2.46	154.058	8
	98.00	98.00	10299.06	10299.07	2.52	153.559	8
	98.00	98.00	10299.07	10527.67	2.57	153.061	8
	98.00	98.00	10527.67	10640.48	2.63	152.562	8
	98.00	98.00	10640.48	10460.78	2.68	152.063	8
	98.00	98.00	10460.78	10370.93	2.74	151.565	8
	98.00	98.00	10370.93	10326.81	2.80	151.066	8
	98.00	98.00	10326.81	10381.55	2.85	150.568	8
	98.00	98.00	10381.55	10530.41	2.91	150.069	8
	98.00	98.00	10530.41	10405.75	2.96	149.571	8
	98.00	98.00	10405.75	10347.42	3.02	149.072	8
	98.00	98.00	10347.42	10317.25	3.07	148.573	8
	98.00	98.00	10317.25	9853.72	3.13	148.075	8
	98.00	98.00	9853.72	1431.41	3.18	147.576	5
	98.00	98.00	1431.41	-1027.65	3.23	147.078	21
	98.00	98.00	-1027.65	-1495.27	3.29	146.579	22
	98.00	98.00	-1495.27	-3731.09	3.35	146.081	27
	98.00	98.00	-3731.09	-3190.92	3.40	145.582	27
	98.00	98.00	-3190.92	-3651.90	3.46	145.084	23
	98.00	98.00	-3651.90	-3815.48	3.52	144.585	23
	98.00	98.00	-3815.48	-3841.15	3.57	144.086	23
	98.00	98.00	-3841.15	-3891.93	3.63	143.588	23
	98.00	98.00	-3891.93	-3828.91	3.68	143.089	23
	98.00	98.00	-3828.91	-190.99	3.74	142.591	21
BATOVI	98.00	98.00	-190.99	5531.93	3.79	142.092	7
	98.00	98.00	5531.93	8435.16	3.85	141.594	8
	98.00	98.00	8435.16	9647.98	3.90	141.096	8
	98.00	98.00	9647.98	10754.39	3.96	140.597	8
	98.00	98.00	10754.39	10557.62	4.01	140.098	8
	98.00	98.00	10557.62	10729.29	4.07	139.599	8
	98.00	98.00	10729.29	11021.19	4.12	139.101	9
	98.00	98.00	11021.19	10941.95	4.18	138.602	9
	98.00	98.00	10941.95	11139.47	4.24	138.104	9
	98.00	98.00	11139.47	11080.19	4.29	137.605	9
	98.00	98.00	11080.19	11168.57	4.35	137.107	9
	98.00	98.00	11168.57	11014.69	4.40	136.608	9
	98.00	98.00	11014.69	11164.18	4.46	136.110	9
	98.00	98.00	11164.18	11082.45	4.51	135.611	9
	98.00	98.00	11082.45	11254.68	4.57	135.112	9
	98.00	98.00	11254.68	10955.74	4.62	134.614	9
	98.00	63.64	10955.74	0.00	4.68	134.115	0
	63.64	0.00	0.00	0.00	4.74	133.617	0
	0.00	0.00	0.00	0.00	5.31	133.118	0
	0.00	53.11	0.00	19589.00	5.33	132.620	1
	53.11	66.61	19589.00	3519.93	5.39	132.121	4
	66.61	67.81	3519.93	3757.36	5.48	131.622	4
	67.81	69.31	3757.36	2959.52	5.56	131.123	4
	69.31	71.71	2959.52	2740.86	5.63	130.625	4
	71.71	71.81	2740.86	2515.54	5.69	130.127	4
	71.81	72.61	2515.54	2188.43	5.77	129.628	4
	72.61	73.31	2188.43	2287.25	5.83	129.130	1
	73.31	73.81	2287.25	4039.45	5.89	128.631	5
	73.81	77.31	4039.45	3572.79	6.05	128.133	5
	77.31	77.91	3572.79	3288.36	6.21	127.634	5
	77.91	80.11	3288.36	3678.81	6.29	127.135	5
	80.11	82.91	3678.81	2948.22	6.37	126.637	5
	82.91	84.11	2948.22	2854.30	6.40	126.138	6
	84.11	84.31	2854.30	5181.52	6.46	125.640	6
STA CATHARINES	84.31	85.31	5181.52	5682.00	6.52	125.141	7
	85.31	87.11	5682.00	10248.78	6.58	124.643	8
	87.11	87.81	10248.78	12792.83	6.64	124.144	8
	87.81	97.81	12792.83	6858.78	6.69	123.646	8
	97.81	98.81	6858.78	10541.21	6.74	123.147	8
	98.81	98.81	10541.21	10717.50	6.80	122.648	8
	98.81	98.81	10717.50	10448.27	6.85	122.150	8
	98.81	98.81	10448.27	10448.66	6.91	121.651	9

Figura D.5.a

UNICAMP

	92.22	92.22	10950.42	10942.30	2746	121.153	9
	92.22	92.22	10952.33	10944.63	2742	120.654	9
	92.22	92.22	10954.62	10946.91	2737	120.156	9
	92.22	92.22	10956.91	10949.20	2733	119.657	9
	92.22	92.22	10959.20	10951.49	2728	119.159	9
	92.22	92.22	10961.49	10953.78	2724	118.660	9
	92.22	92.22	10963.78	10956.07	2719	118.161	9
	92.22	92.22	10966.07	10958.36	2715	117.663	9
	92.22	92.22	10968.36	10960.65	2711	117.164	9
	92.22	92.22	10970.65	11724.02	2746	116.666	9
	92.22	92.22	11724.02	8170.25	2752	116.167	9
	92.22	92.22	8170.25	3115.10	2757	115.669	9
	92.22	92.22	3115.10	1918.87	2763	115.170	9
	92.22	92.22	1918.87	-150.59	2768	114.671	21
	92.22	92.22	-150.59	-744.93	2774	114.173	21
	92.22	92.22	-744.93	-1042.29	2779	113.674	21
	92.22	92.22	-1042.29	-1111.31	2785	113.176	21
	92.22	92.22	-1111.31	-1225.28	2791	112.677	21
	92.22	92.22	-1225.28	-1237.27	2796	112.179	21
	92.22	92.22	-1237.27	-1310.76	2802	111.680	21
	92.22	92.22	-1310.76	-1325.01	2807	111.182	21
	92.22	92.22	-1325.01	-1332.13	2813	110.683	21
	92.22	92.22	-1332.13	-77.74	2818	110.184	21
	92.22	92.22	-77.74	1807.11	2824	109.686	5
	92.22	92.22	1807.11	2749.99	2829	109.187	5
	92.22	92.22	2749.99	3221.20	2835	108.689	5
	92.22	92.22	3221.20	3594.79	2840	108.190	5
	92.22	92.22	3594.79	3546.18	2846	107.692	5
	92.22	92.22	3546.18	3569.17	2851	107.193	5
	92.22	92.22	3569.17	3768.31	2857	106.695	5
	92.22	92.22	3768.31	0.00	2863	106.196	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	2869	105.697	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	2875	105.199	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	2881	104.700	5
	92.22	92.22	0.00	19520.00	2939	104.202	5
	92.22	92.22	19520.00	5285.10	2966	103.703	5
	92.22	92.22	5285.10	4775.76	2973	103.205	5
	92.22	92.22	4775.76	4581.44	2979	102.706	5
	92.22	92.22	4581.44	7829.80	2986	102.208	5
	92.22	92.22	7829.80	6250.39	2992	101.709	5
	92.22	92.22	6250.39	5816.83	2999	101.210	5
	92.22	92.22	5816.83	5516.17	3005	100.712	5
	92.22	92.22	5516.17	5330.42	3011	100.213	5
	92.22	92.22	5330.42	5193.84	3016	99.715	5
	92.22	92.22	5193.84	5254.91	3022	99.216	5
	92.22	92.22	5254.91	4903.91	3027	98.718	5
	92.22	92.22	4903.91	5495.52	3033	98.219	5
	92.22	92.22	5495.52	5212.35	3039	97.720	5
	92.22	92.22	5212.35	9237.30	3044	97.222	5
	92.22	92.22	9237.30	-69.77	3049	96.723	21
	92.22	92.22	-69.77	4516.67	3055	96.225	7
	92.22	92.22	4516.67	4494.91	3061	95.726	7
	92.22	92.22	4494.91	4635.70	3066	95.228	7
	92.22	92.22	4635.70	4819.43	3071	94.729	7
	92.22	92.22	4819.43	4441.79	3077	94.231	7
	92.22	92.22	4441.79	4735.32	3083	93.732	7
	92.22	92.22	4735.32	4838.77	3089	93.233	7
	92.22	92.22	4838.77	5256.94	3094	92.735	7
	92.22	92.22	5256.94	5220.39	3099	92.236	7
	92.22	92.22	5220.39	5222.75	3105	91.738	7
	92.22	92.22	5222.75	5221.93	3110	91.239	7
	92.22	92.22	5221.93	5224.52	3116	90.741	7
	92.22	92.22	5224.52	5415.29	3121	90.242	7
	92.22	92.22	5415.29	5320.20	3127	89.743	7
	92.22	92.22	5320.20	5272.63	3132	89.245	7
	92.22	92.22	5272.63	5248.80	3138	88.746	7
	92.22	92.22	5248.80	5433.67	3143	88.248	7
	92.22	92.22	5433.67	5314.39	3149	87.749	7
	92.22	92.22	5314.39	6170.61	3155	87.251	7
	92.22	92.22	6170.61	8039.59	3160	86.752	8
	92.22	92.22	8039.59	8974.30	3166	86.253	8
	92.22	92.22	8974.30	9341.43	3171	85.755	8
	92.22	92.22	9341.43	9524.99	3177	85.256	8
	92.22	92.22	9524.99	9751.20	3182	84.758	8
	92.22	92.22	9751.20	9735.81	3188	84.259	8
	92.22	92.22	9735.81	9737.10	3193	83.761	8
	92.22	92.22	9737.10	9810.61	3199	83.262	8
	92.22	92.22	9810.61	0.00	3205	82.763	8
	92.22	92.22	0.00	0.00	3211	82.265	8
	92.22	92.22	0.00	0.00	3216	81.767	8
	92.22	92.22	0.00	19500.00	3222	81.268	5
	92.22	92.22	19500.00	8105.45	3228	80.769	5
	92.22	92.22	8105.45	7721.80	3234	80.271	5
	92.22	92.22	7721.80	9581.50	3239	79.772	5
	92.22	92.22	9581.50	8284.50	3245	79.273	5
	92.22	92.22	8284.50	7655.14	3250	78.774	5
	92.22	92.22	7655.14	7287.87	3256	78.275	5
	92.22	92.22	7287.87	9011.20	3261	77.776	5
	92.22	92.22	9011.20	8021.22	3267	77.278	5
	92.22	92.22	8021.22	12126.97	3273	76.781	5
	92.22	92.22	12126.97	10105.90	3278	76.282	5
	92.22	92.22	10105.90	9434.74	3284	75.783	5
	92.22	92.22	9434.74	5812.15	3289	75.284	5
	92.22	92.22	5812.15	7073.50	3295	74.785	5
	92.22	92.22	7073.50	7422.45	3300	74.286	5
	92.22	92.22	7422.45	7427.87	3306	73.787	5
	92.22	92.22	7427.87	7100.50	3311	73.288	5
	92.22	92.22	7100.50	7104.91	3317	72.789	5
	92.22	92.22	7104.91	7115.12	3322	72.290	5
	92.22	92.22	7115.12	7112.21	3328	71.791	5
	92.22	92.22	7112.21	7114.75	3333	71.292	5
	92.22	92.22	7114.75	0.00	3339	70.793	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3344	70.294	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3350	69.795	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3355	69.296	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3361	68.797	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3366	68.298	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3372	67.799	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3377	67.300	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3383	66.801	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3388	66.302	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3394	65.803	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3399	65.304	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3405	64.805	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3410	64.306	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3416	63.807	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3421	63.308	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3427	62.809	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3432	62.310	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3438	61.811	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3443	61.312	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3449	60.813	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3454	60.314	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3460	59.815	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3465	59.316	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3471	58.817	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3476	58.318	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3482	57.819	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3487	57.320	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3493	56.821	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3498	56.322	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3504	55.823	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3509	55.324	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3515	54.825	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3520	54.326	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3526	53.827	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3531	53.328	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3537	52.829	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3542	52.330	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3548	51.831	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3553	51.332	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3559	50.833	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3564	50.334	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3570	49.835	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3575	49.336	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3581	48.837	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3586	48.338	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3592	47.839	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3597	47.340	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3603	46.841	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3608	46.342	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3614	45.843	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3619	45.344	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3625	44.845	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3630	44.346	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3636	43.847	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3641	43.348	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3647	42.849	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3652	42.350	5
	92.22	92.22	0.00	0.00	3658	41.851	5
	92.22	92.22	0.00	0			

MORTOLANDIA

BOA VISTA

CAMPINAS

KILOMETRO 39,3

KILOMETRO 34

VALINHOS

VINHEDO

KILOMETRO 72,3

KILOMETRO 17

61.24	64.29	7156.64	6533.88	1.516	67.867	5
61.24	64.29	6514.46	7028.78	1.511	67.708	6
61.24	71.24	9424.78	7458.31	1.511	66.810	7
71.24	71.24	7062.44	7426.48	1.517	66.311	8
71.24	71.24	7426.48	7124.37	1.561	65.813	9
74.29	76.29	7124.37	9798.37	1.570	65.314	0
74.29	74.29	8770.87	7865.81	1.576	64.816	1
78.29	87.29	7865.87	12206.57	1.592	64.317	2
78.29	86.29	12206.57	10211.46	1.598	63.818	3
86.29	89.29	10211.46	9137.11	1.591	63.320	4
86.29	81.27	9137.11	0.00	1.640	62.821	5
81.27	80.47	0.00	10998.54	1.645	62.323	6
80.47	81.27	12206.54	11665.42	1.611	61.824	7
81.27	85.27	11665.42	14161.82	1.617	61.326	8
85.27	84.27	14161.82	13156.60	1.623	60.827	9
88.27	90.28	13156.60	9934.95	1.628	60.329	0
90.28	98.28	9934.95	11667.20	1.614	59.830	1
90.28	98.28	11667.20	11751.55	1.619	59.331	2
98.28	98.28	11751.55	11722.35	1.645	58.833	3
98.28	98.28	11722.35	11736.76	1.640	58.334	4
98.28	98.28	11736.76	11778.32	1.646	57.836	5
98.28	98.28	11778.32	11734.71	1.641	57.337	6
98.28	98.28	11734.71	11712.93	1.667	56.839	7
98.28	98.28	11712.93	11714.88	1.672	56.340	8
98.28	98.28	11714.88	11817.98	1.678	55.842	9
98.28	98.28	11817.98	11751.57	1.681	55.343	0
98.28	98.28	11751.57	11722.86	1.687	54.844	1
98.28	98.28	11722.86	11945.89	1.695	54.346	2
98.28	98.28	11945.89	11818.13	1.700	53.847	3
98.28	98.28	11818.13	11754.61	1.706	53.349	4
98.28	98.28	11754.61	11722.90	1.711	52.850	5
98.28	98.28	11722.90	11501.25	1.717	52.352	6
98.28	98.28	11501.25	11144.65	1.722	51.853	7
98.28	98.28	11144.65	11226.36	1.728	51.354	8
98.28	98.28	11226.36	10947.20	1.731	50.856	9
98.28	98.28	10947.20	11145.71	1.749	50.357	0
98.28	98.28	11145.71	11806.88	1.744	49.859	1
98.28	98.28	11806.88	10937.46	1.753	49.360	2
98.28	98.28	10937.46	11741.81	1.756	48.862	3
98.28	98.28	11741.81	11055.93	1.761	48.363	4
98.28	98.28	11055.93	10951.99	1.767	47.865	5
98.28	98.28	10951.99	10915.82	1.772	47.366	6
98.28	98.28	10915.82	10991.54	1.778	46.867	7
98.28	98.28	10991.54	10879.79	1.783	46.369	8
98.28	98.28	10879.79	10873.92	1.789	45.870	9
98.28	98.28	10873.92	10878.99	1.794	45.372	0
98.28	67.64	10878.99	0.00	1.801	44.873	1
67.64	0.00	0.00	0.00	1.815	44.375	2
0.00	0.00	0.00	0.00	1.866	43.876	3
0.00	0.00	0.00	19500.00	1.890	43.378	4
41.26	55.76	19500.00	11588.15	1.908	42.879	5
55.76	59.46	11588.15	13893.93	1.908	42.380	6
59.46	62.26	13893.93	11598.13	1.917	41.882	7
62.26	63.76	11598.13	10874.27	1.921	41.383	8
63.76	67.16	10874.27	14629.64	1.932	40.885	9
67.16	71.26	14629.64	11902.27	1.937	40.386	0
71.26	75.26	11902.27	15628.52	1.946	39.888	1
75.26	74.26	15628.52	8132.19	1.952	39.389	2
74.26	79.66	8132.19	5951.62	1.958	38.890	3
79.66	81.46	5951.62	1348.20	1.965	38.392	4
81.46	82.46	1348.20	1252.83	1.971	37.893	5
82.46	83.16	1252.83	8.98	1.976	37.395	6
83.16	85.28	8.98	412.85	1.982	36.896	7
85.28	85.62	412.85	6.70	1.987	36.398	8
85.62	86.42	6.70	6.09	1.993	35.899	9
86.42	87.22	6.09	5.66	1.998	35.401	0
87.22	87.82	5.66	5.14	2.003	34.902	1
87.82	98.28	5.14	-2181.34	2.009	34.403	2
98.28	98.28	-2181.34	731.68	2.015	33.904	3
98.28	98.28	731.68	4342.81	2.022	33.406	4
98.28	98.28	4342.81	6158.77	2.028	32.907	5
98.28	98.28	6158.77	5537.38	2.031	32.409	6
98.28	98.28	5537.38	7080.56	2.037	31.911	7
98.28	98.28	7080.56	0.00	2.042	31.412	8
98.28	81.45	0.00	10902.53	2.048	30.913	9
81.45	85.25	10902.53	10881.72	2.054	30.415	0
85.25	87.25	10881.72	10135.95	2.060	29.916	1
87.25	89.15	10135.95	13391.99	2.066	29.418	2
89.15	90.25	13391.99	7174.79	2.071	28.919	3
90.25	92.26	7174.79	10275.42	2.076	28.421	4
92.26	98.28	10275.42	10471.87	2.092	27.922	5
98.28	98.28	10471.87	10339.91	2.098	27.424	6
98.28	98.28	10339.91	10271.98	2.093	26.925	7
98.28	98.28	10271.98	10557.27	2.099	26.426	8
98.28	98.28	10557.27	10331.64	2.104	25.928	9
98.28	98.28	10331.64	10276.15	2.110	25.429	0
98.28	98.28	10276.15	10592.09	2.116	24.931	1
98.28	98.28	10592.09	10400.05	2.121	24.432	2
98.28	98.28	10400.05	10710.51	2.127	23.934	3
98.28	98.28	10710.51	10474.29	2.133	23.435	4
98.28	98.28	10474.29	11773.63	2.137	22.937	5
98.28	98.28	11773.63	13536.01	2.143	22.438	6
98.28	75.45	13536.01	0.00	2.149	21.940	7
75.45	64.21	0.00	17375.22	2.155	21.441	8
64.21	72.21	17375.22	17472.64	2.162	20.942	9
72.21	76.21	17472.64	10754.45	2.168	20.443	0
76.21	79.21	10754.45	3126.27	2.171	19.945	1
79.21	81.21	3126.27	11.63	2.171	19.446	2
81.21	81.21	11.63	0.00	2.177	18.947	3
81.21	84.21	0.00	5.93	2.193	18.448	4
84.21	98.28	5.93	-6521.43	2.199	17.949	5
98.28	98.28	-6521.43	-6521.43	2.204	17.450	6
98.28	98.28	-6521.43	-6521.43	2.209	16.951	7
98.28	98.28	-6521.43	-6521.43	2.215	16.452	8
98.28	98.28	-6521.43	-6521.43	2.220	15.953	9

Figura D.5.c

LOUVEIRA	98,82	98,88	1592,43	2928,17	2,226	15,452	6
	98,82	98,88	2928,17	6692,32	2,232	14,969	7
	98,82	98,88	6692,32	18676,71	2,237	14,461	8
	98,82	98,88	18676,71	13244,28	2,243	13,962	9
	98,82	98,88	13244,28	14633,13	2,248	13,464	9
	98,82	98,88	14633,13	18697,27	2,254	12,965	9
	98,82	98,88	18697,27	15337,65	2,259	12,467	9
	98,82	74,84	15337,65	0,00	2,265	11,968	0
	74,84	66,33	0,00	18212,13	2,271	11,470	9
	66,33	78,53	18212,15	18615,81	2,278	10,971	8
CORRUPINA	78,53	74,23	18615,81	16235,32	2,295	10,473	8
	74,23	76,93	16235,32	14692,62	2,292	9,974	8
	76,93	88,73	14692,62	12795,51	2,298	9,475	8
	88,73	84,83	12795,51	19970,52	2,304	8,977	8
	84,83	89,13	19970,52	9710,24	2,310	8,478	8
	89,13	98,88	9710,24	2894,16	2,315	7,980	5
	98,88	98,88	2894,16	5617,48	2,321	7,481	7
	98,88	98,88	5617,48	5699,65	2,326	6,983	7
	98,88	98,88	5699,65	6297,59	2,332	6,484	7
	98,88	98,88	6297,59	5411,53	2,337	5,986	7
NORTO	98,88	98,88	5411,53	5494,39	2,343	5,487	7
	98,88	98,88	5494,39	5692,67	2,348	4,988	7
	98,88	84,12	5692,67	0,00	2,354	4,490	0
	84,12	83,86	0,00	18881,42	2,360	3,991	8
	83,86	87,16	18881,42	12366,85	2,366	3,493	8
	87,16	98,88	12366,85	2312,51	2,371	2,994	5
	98,88	73,48	2312,51	0,00	2,377	2,496	0
	73,48	51,96	0,00	0,00	2,385	1,997	0
	51,96	8,62	0,00	0,00	2,404	1,498	0
	8,62	0,00	0,00	0,00	2,431	1,000	0
JUNDIAIA	0,00	0,00	0,00	0,00	2,431	1,000	0

Figura D.5.d

APÊNDICE E

Neste Apêndice serão mostradas algumas saídas de simulações da aplicação do Capítulo VI, baseadas em um critério de melhora do desempenho elétrico do sistema , para variações dos despachos em torno dos pontos de operação especificados.

E.1 - O DESEMPENHO ELÉTRICO

Definindo-se um critério que justifique o desempenho elétrico do sistema ferroviário eletrificado: (8)

$$E = \int_0^{T_s} \left\{ \sum_{k=1}^{NT(t)} P_k(t) \right\} . dt + \int_0^{T_s} \Delta p(t) . dt \quad (E.1)$$

onde $P_k(t)$ = potência absorvida pelo trem k no instante t .

$NT(t)$ = número de trens no sistema no instante t .

$\Delta p(t)$ = perdas nos elementos eletricamente ativos do sistema no instante t .

T_s = tempo de simulação.

E.2 - SAÍDAS DE SIMULAÇÕES

PARTIDAS :

TREM	HORARIO		TIPO	KM INICIAL	KM FINAL
P06	9.00H	9.00MIN	PASAG	174.0	1.0
P05	9.00H	24.00MIN	PASAG	1.0	174.0
P08	10.00H	6.00MIN	PASAG	174.0	1.0
P07	10.00H	24.00MIN	PASAG	1.0	174.0
P10	11.00H	24.00MIN	PASAG	174.0	1.0

***** CRITERIO DO DESEMPENHO *****
***** ELETRICO 132.304 MW/HORA *****

***** TEMPO DE SIMULACAO 321 HORAS *****

***** TEMPOS DE ESPERA * MINUTOS *****

*****	TREM	P06	=	0000	*****
*****	TREM	P05	=	30000	*****
*****	TREM	P08	=	15000	*****
*****	TREM	P07	=	3000	*****
*****	TREM	P10	=	0000	*****

***** CRITERIO DE ATRASO 48000 MINUTOS *****

Figura E.1

REPRESENTACAO GRAFICA DO MOVIMENTO DOS TRENS
DIAGRAMA ESPACO X TEMPO

- * TREM NO SENTIDO IMPORTACAO
- * TREM NO SENTIDO EXPORTACAO

PARADAS PROGRAMADAS : KM	ESTACAO
174.8	ITIRA
133.8	RECLAR
103.3	LIMEI
82.8	AMERI
69.6	SUMAR
44.0	CAMPI
1.0	JUNDI

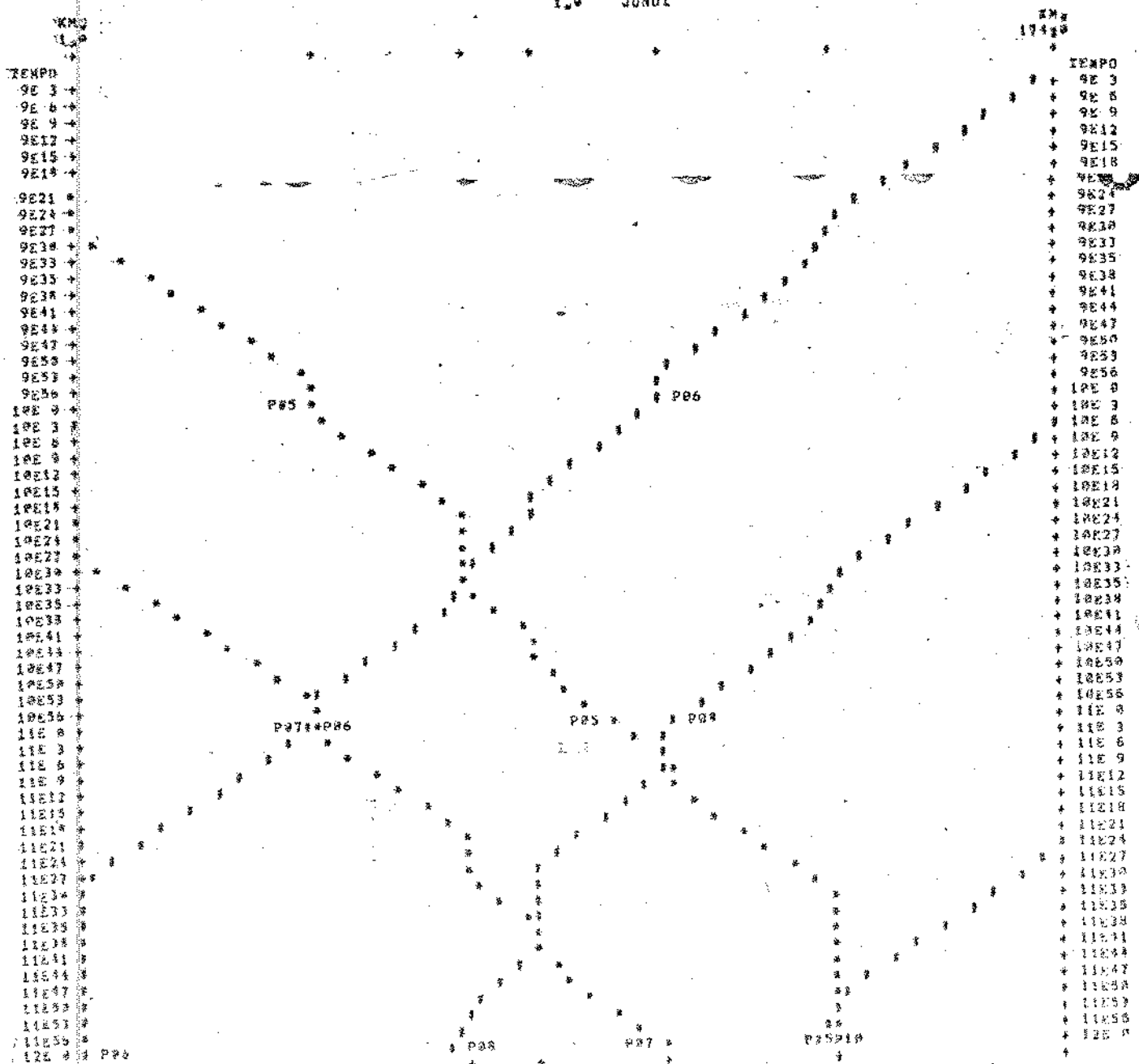


Figura E.2

PARTIDAS :

TREM	HORARIO		TIPO	KM INICIAL	KM FINAL
P06	9.0H3	9.6MIN3	PASAG	174.9	1.9
P05	9.0H3	39.6MIN3	PASAG	1.9	174.9
P08	10.0H3	6.6MIN3	PASAG	174.9	1.9
P07	10.0H3	24.6MIN3	PASAG	1.9	174.9
P10	11.0H3	24.6MIN3	PASAG	174.9	1.9

***** CRITERIO DO DESEMPENHO *****
***** ELETRICO 132.152 M3/HORA *****

***** TEMPO DE SIMULACAO 301 HORAS *****

***** TEMPOS DE ESPERA = MINUTOS *****

*****	TREM	P06	=	0000	*****
*****	TREM	P05	=	2400	*****
*****	TREM	P08	=	1500	*****
*****	TREM	P07	=	3000	*****
*****	TREM	P10	=	0000	*****

***** CRITERIO DE ATRASO 42.00 MINUTOS *****

Figura E.3

REPRESENTACAO GRAFICA DO MOVIMENTO DOS TRENS
DIAGRAMA ESPACO X TEMPO

- * TREM NO SENTIDO IMPORTACAO
- ! TREM NO SENTIDO EXPORTACAO

PARADAS PROGRAMADAS : KM	ESTACAO
174.8	ITIRA
133.8	RCLAR
103.5	LIMAI
82.8	AMERI
69.8	SUMAR
44.8	CAMPI
1.8	JUNOI

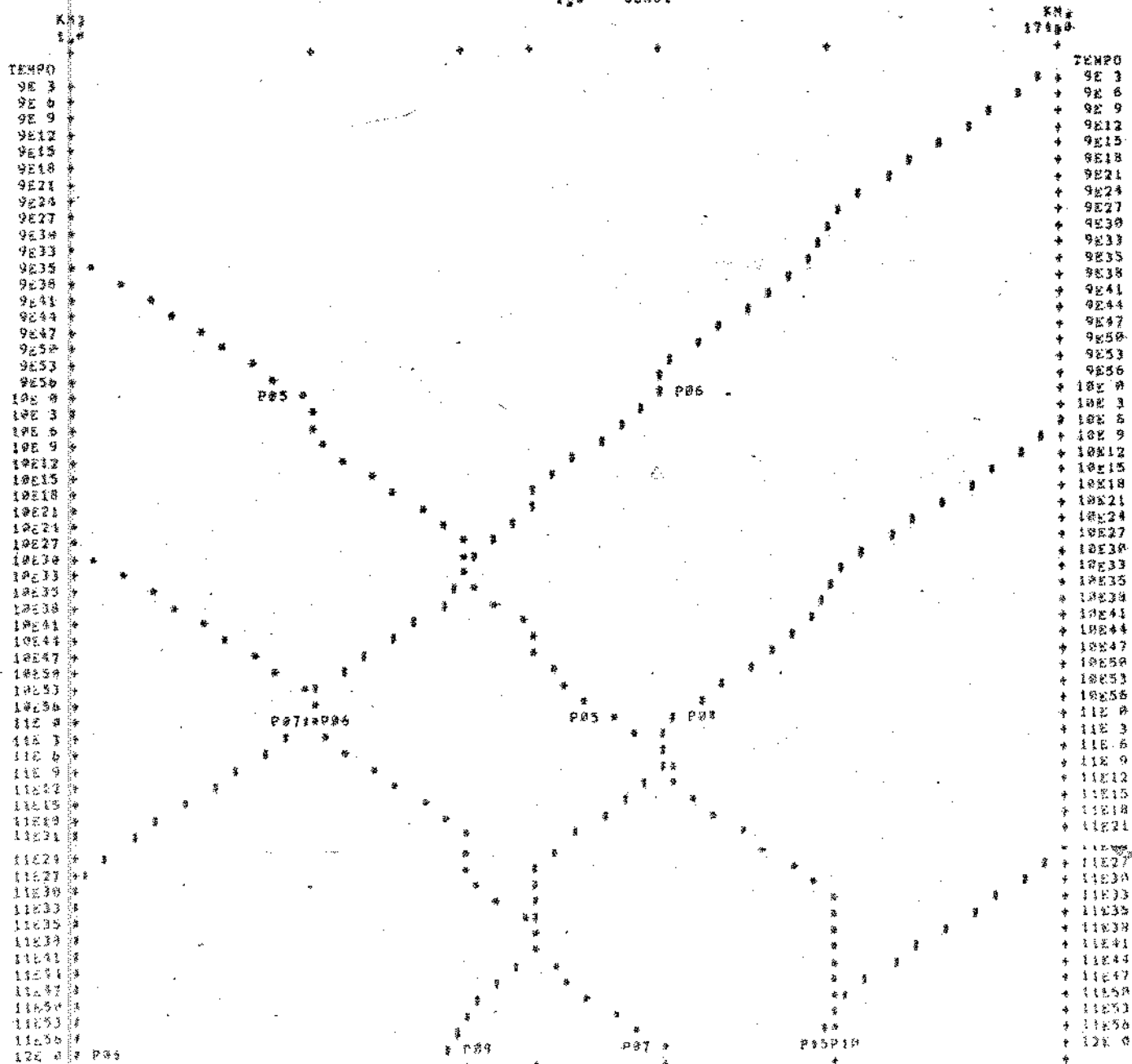


Figura E.4

PARTIDAS :					
TREM	HORARIO		TIPO	KM INICIAL	KM FINAL
P06	9,00H	8,0MIN	PASAG	174,0	1,0
P05	9,00H	24,0MIN	PASAG	1,0	174,0
P08	10,00H	12,0MIN	PASAG	174,0	1,0
P07	10,00H	24,0MIN	PASAG	1,0	174,0
P10	11,00H	24,0MIN	PASAG	174,0	1,0

*****	CRITERIO DO DESEMPENHO			*****	
*****	ELETRICO			130,940	MINUTOS *****

*****	TEMPO DE SIMULACAO			301	HORAS *****

Figura E.5

REPRESENTAÇÃO GRAFICA DO MOVIMENTO DOS TRENS

DIAGRAMA ESPACO X TEMPO

1 TREM NO SENTIDO IMPORTAÇÃO

2 TREM NO SENTIDO EXPORTAÇÃO

PARADAS PROGRAMADAS 1 KM ESTACAO

174,8	ITIRA
133,8	RECLAR
105,5	LIMZI
82,9	AMERI
69,4	SUNAR
44,8	CAMP
1,0	JUNOI

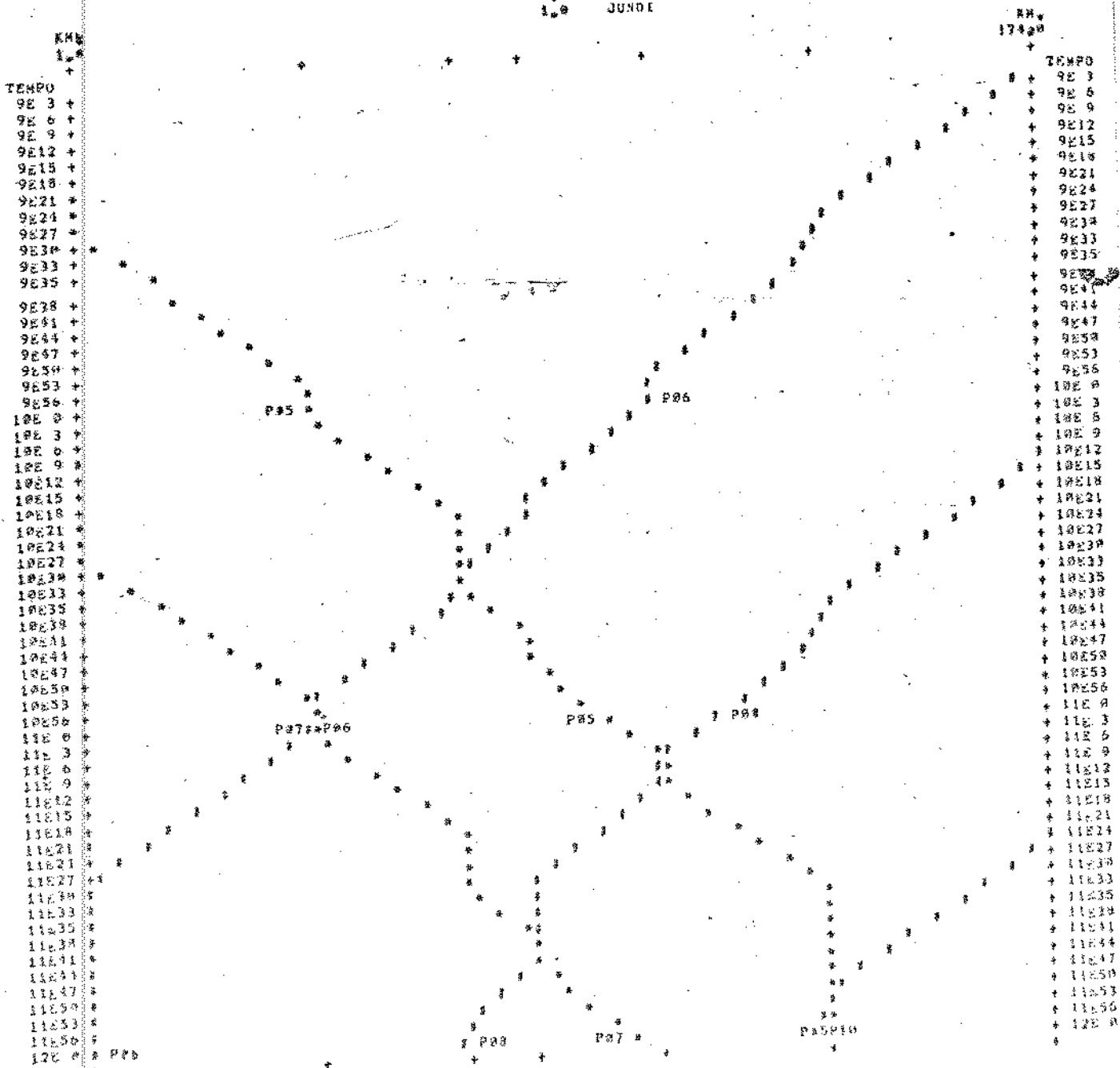


Figura E.6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - GARREAU, M -
"La Traction Électrique"
Éditions Scientifiques Riber
Paris - 1965
- 2 - DOVER, A.T. -
"Electric Traction"
Pitman & Sons Ltd.
London - 1963
- 3 - TOGNO, F.M. -
"Ferrocarriles"
Representaciones y Servicios de Ingenieria S.A.
Mexico - 1974
- 4 - ELGERD, O.I. -
"Electric Energy Systems Theory"
Mc Graw-Hill Book Company
USA - 1971
- 5 - STAGG, G.W. , EL-ABIAD, A.H. -
"Computer Methods in Power System Analysis"
Mc Graw-Hill Kogakuska Ltd.
Tokio - 1968
- 6 - CHRISTIE, C.V. -
"Electrical Engineering"
Mc Graw-Hill Book Company
USA - 1966
- 7 - KUESTER, J.L. , MIZE, J.H. -
"Optimization Techniques with Fortran"
Mc Graw-Hill Book Company
USA - 1973
- 8 - CHANG, CHE-SAU -
"Digital Computer Simulation and Optimization of A.C. Railway
Electrification"

Thesis submitted to the Victoria University of Manchester for
the degree of Doctor of Philosophy
Manchester - 1975

- 9 - DECKMAN S.M. -
"Modelo Desacoplado para Calcular Queda de Tensão e Fluxo de
Corrente em Redes Reticuladas de Baixa Tensão"
Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia de Cam
pinas - UNICAMP
Publicação Interna 05/76 - FEC - UNICAMP, Campinas
- 10 - FENTON, R.G. -
"Optimum Design and Operation of Subway Systems"
University of Toronto - Canada
- 11 - TALUKDAR, S. , ROBERT, K. -
"The Analysis of Electrified Ground Transportation Networks"
IEEE Trans. Power
Apparatus & Systems - Vol. 1976
- 12 - CATTANEO, J.L. -
"Simulacion de la Marcha de um Trem - Simulacion de la Deriva"
XIII Congresso Panamericano de Ferrocarriles
Caracas - Venezuela - 1975
- 13 - KOKOTOVIC, P. , SINGH, G. -
"Application of Maximum Principle to Optimum Control of an
Electric Train"
III Asilomar Conference on Circuits and Systems - 1969
- 14 - KORANYI, L. -
"Design of DC Power Supply for Rapid Transit Systems"
IEEE Transactions on Industry and General Applications - 1965
- 15 - TINNEY, W.F. , SATO, N. -
"Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance
Matrix"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems - 1973
- 16 - STOTT, B. , ALSAÇ, O. -
"Fast Decoupled Load Flow"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems - 1973

17 - JORNAL DOS TRANSPORTES -

Centro de Documentação e Publicações do Ministério dos Transportes
do Brasil - 1974/1975/1976

18 - REVISTAS AIT -

Asociacion de Investigacion del Transporte
Espanha - 1975/1976