

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA - DSCE

LOCOMOTIVAS DE C.A.: UMA ANÁLISE HARMÔNICA DA CORRENTE

AUTOR : LUIZ GONÇALVES JUNIOR <sup>SB<sup>2</sup></sup>  
ORIENTADOR : PROF. DR. CARLOS RODRIGUES DE SOUZA \*

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por LUIZ GONÇALVES JUNIOR  
Jugadora em 30, 06, 1993 e aprovada pela Comissão  
Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

junho de 1993

Dedico este trabalho aos meus pais,  
pelo exemplo de abnegação e  
profissão de fé com que enfrentam  
as adversidades.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Rodrigues de Souza, por todo o apoio e orientação dados neste trabalho

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Unesp - Campus de Bauru que colaboraram neste trabalho, em especial ao professor Pedro da Costa Junior pelo auxílio nas rotinas computacionais.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia da Unesp - Campus de Bauru, em especial ao desenhista Marco Antônio Rossi que confeccionou os desenhos.

A todos os colegas da Pós Graduação, em especial ao amigo Dionizio Paschoarelli Junior cujo estímulo e amizade foram bastante significativos na consecução deste trabalho

## RESUMO

O uso de tração elétrica alimentada com corrente alternada, cujo controle é feito através de tiristores, está bastante difundido em muitos países. Embora tais componentes de controle propiciem um desempenho melhor à tração, eles também introduzem distúrbios nada desprezíveis, não só no próprio sistema de alimentação de tração como também no sistema de corrente alternada ao qual está conectado.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um procedimento capaz de analisar a corrente absorvida por uma locomotiva típica de um sistema de tração elétrica de corrente alternada. O sistema escolhido é aquele cujas locomotivas são alimentadas com alta tensão monofásica de frequência industrial, através de pantógrafos. Essas locomotivas estão equipadas com um transformador abaixador fixo (isto é, não existe mudança de "tap") que alimenta um conversor CA/CC constituído de pontes retificadoras semi-controladas a tiristores. Os motores de tração ligados à esse conversor são de corrente contínua e excitados separadamente.

Os resultados obtidos através da aplicação desse procedimento serão utilizados como subsídios para a avaliação e controle de sobretensões na linha de alimentação, um problema que pode vir a ocorrer nesse tipo de acionamento elétrico.

## ABSTRACT

AC thyristor controlled electric traction became very usual around the world. Thyristors provide good control performance but they always cause problems to the traction electric system. Overvoltages may arise in the contact line feeding the locomotive and also harmonics generated in the thyristors may affect the grid to which the whole system is connected.

The aim of this work is to obtain a procedure to be used in the analysis of the current drawn by the locomotive from the contact wire. In the system selected to be investigated the locomotive is fed from industrial frequency AC high voltage mains and a step-down transformer is used to adequate the voltage to be applied to the motors. The separately-excited motors are fed from a set of cascaded rectifier bridges.

Since a procedure can be developed to analyse the locomotive current, overvoltages in the contact wire can be predicted and controlled by means of filters.

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO   | 1.1  |
| 1.1 - Considerações Iniciais  | 1.1  |
| 1.2 - Encaminhamento da Solução do Problema   | 1.2  |
| 1.3 - Desenvolvimento dos Capítulos   | 1.3  |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO II - SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA MONOFÁSICA<br>DE FREQUÊNCIA INDUSTRIAL                          | 2.1  |
| 2.1 - Introdução  | 2.1  |
| 2.2 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Tracção  | 2.2  |
| 2.3 - Princípio de Funcionamento da Locomotiva  | 2.4  |
| 2.4 - Desempenho do Motor de Tracção  | 2.5  |
| 2.5 - Influência da Operação do Conversor Sobre a Forma de<br>Onda da Corrente que Circula Pela Catenária | 2.10 |
| 2.6 - O Aparecimento de Sobretensão na Catenária  | 2.11 |
| 2.7 - Considerações Finais  | 2.12 |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO III - MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DA TENSÃO DA<br>LINHA DE CONTATO                                  | 3.1  |
| 3.1 - Introdução  | 3.1  |
| 3.2 - Simulação Digital - Representação por Equações e<br>Funções   | 3.2  |
| 3.2.1 - Modelo de Corrente Constante  | 3.3  |
| 3.2.2 - Modelo com Impedância da Fonte Zero   | 3.4  |
| 3.2.3 - Modelo com Impedância de Fonte Finita   | 3.7  |
| 3.3 - Equacionamento do Circuito Onde a Impedância da Fonte<br>é Considerada                              | 3.9  |
| 3.3.1 - Corrente na Entrada da Ponte Retificadora   | 3.9  |
| 3.3.2 - Corrente do Circuito do Motor Durante a<br>Comutação  | 3.11 |
| 3.4 - Cálculo dos Ângulos de Comutação  | 3.12 |
| 3.5 - Programa de Simulação Numérica Global de Conversores<br>Estáticos                                   | 3.16 |
| 3.6 - Obtenção da Corrente da Locomotiva Através do SACEC   | 3.18 |

|   |       |
|---|-------|
| 3.7 - Confrontação de Resultados de Simulação e Experimentais                         | 3.20  |
| 3.8 - Considerações Finais  | 3.23  |
| <br>  |       |
| CAPÍTULO IV - OBTENÇÃO DA FORMA DE ONDA DA TENSÃO DA LINHA DE CONTATO                 | 4.1   |
| <br>  |       |
| 4.1 - Introdução  | 4.1   |
| 4.2 - Considerações Quanto a Representação da Linha de Contato                        | 4.1   |
| 4.3 - Ressonância no Sistema de Alimentação da Locomotiva                             | 4.4   |
| 4.4 - Uso de Filtros Para Aliviar a Magnitude das Sobretensões                        | 4.5   |
| 4.5 - Descrição do Procedimento Para a Obtenção da Forma de Onda da Tensão            | 4.6   |
| 4.5.1 - Introdução  | 4.6   |
| 4.5.2 - Detalhamento dos Passos Listados no Procedimento                              | 4.6   |
| 4.6 - Obtenção da Tensão em Posição Diferente da Locomotiva                           | 4.13  |
| 4.7 - Considerações Finais  | 4.15  |
| <br>  |       |
| CAPÍTULO V - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS  | 5.1   |
| <br>  |       |
| 5.1 - Introdução  | 5.1   |
| 5.2 - Resultados de Casos Selecionados  | 5.2   |
| 5.3 - Considerações Finais  | 5.20  |
| <br>  |       |
| CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS   | 6.1   |
| <br>  |       |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS  | R.B.1 |
| <br>  |       |
| APÊNDICE A - COMPARAÇÃO ENTRE CONVERSORES DE UM E DOIS ESTÁGIOS                       | A.1   |
| <br>  |       |
| APÊNDICE B - APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA GLOBAL AO RAMO DA LOCOMOTIVA | B.1   |

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações Iniciais

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver um procedimento de análise, que permita, partindo-se da forma de onda da corrente da locomotiva, avaliar a possível presença de sobretensões na linha de contato.

Locomotivas alimentadas com tensão alternada de frequência industrial (locomotivas CA), cujo controle é feito através de pontes tiristorizadas, podem causar perturbações, inclusive em seu próprio sistema de alimentação. Já se sabe que esses efeitos são potencialmente perigosos, tornando-se necessário eliminá-los ou limitá-los. Com esse propósito, este trabalho descreve um procedimento que permite avaliar, através de um computador digital do tipo PC, diversos fatores envolvidos com o aparecimento de tais perturbações e suas consequências.

Sabe-se que as locomotivas CA funcionam, com relação ao sistema de alimentação no qual elas estão conectadas, como cargas especiais que absorvem corrente não senoidal. Isto é decorrência do processo de chaveamento que se dá no sistema de retificação dessas locomotivas, durante a fase em que está ocorrendo a aceleração da composição. A forma de onda da corrente absorvida depende fortemente, não apenas do ângulo  $\alpha$  de gatilhamento dos tiristores, mas também da posição que a locomotiva está ocupando no trecho de linha. Distorções podem vir a ser observadas nas formas de onda da tensão de alimentação. Também a rede pública que



alimenta o sistema de tração pode vir a ser afetada, causando transtornos a outros usuários da mesma.

Por outro lado, o fato da corrente ser não senoidal significa, em termos de análise matemática, que esta pode ser representada através de componentes fundamental e harmônicas. Em razão de ressonâncias que podem vir a ser observadas no sistema de alimentação, em virtude de componentes harmônicas de corrente próximas das respectivas frequências naturais do mesmo, não está descartada a possibilidade de que sobretensões possam surgir na linha de alimentação. Diante desta perspectiva, tanto o sistema de alimentação da tração quanto a locomotiva podem sofrer danos.

## 1.2 - Encaminhamento da Solução do Problema

Inicialmente será necessário selecionar um determinado sistema de tração elétrica, dentre as diversas configurações existentes. Em seguida, as múltiplas condições existentes para os mais diversos valores de ângulo  $\alpha$  de gatilhamento dos tiristores e de posicionamento  $x$  da locomotiva no trecho de linha precisam ser consideradas, porque a forma de onda da corrente é função dessas duas variáveis, para um dado sistema de tração elétrica. Procurar-se-á determinar as condições mais significativas para o estudo do fenômeno, em vez de trabalhar exaustivamente com a ampla gama de valores de  $\alpha$  e  $x$  possíveis. Para os casos de especial interesse selecionados, proceder-se-á a análise dos formas de ondas das correntes correspondentes, obtendo-se suas componentes fundamental e harmônicas.

No passo seguinte, cada componente harmônica da corrente, correspondente às situações selecionadas, será injetada no sistema, para que seja obtida a correspondente componente de tensão. Desse procedimento resulta a forma de onda da tensão da linha de alimentação.

É necessário observar que esse caminho de solução exige que se tenha uma boa representação do sistema, na faixa de frequência de interesse. Esse trabalho tratará somente das sobre-

tensões presentes no sistema de alimentação, não se estendendo o estudo aos efeitos das perturbações na rede pública de fornecimento de energia.

### 1.3 - Desenvolvimento dos Capítulos

No capítulo II é apresentado o sistema de tração elétrica selecionado para o estudo. As causas de distorções nas formas de onda da corrente e tensão são também discutidas nesse capítulo.

No capítulo III são inicialmente discutidas as formas de equacionamento do problema e as soluções apresentadas por diversos autores. Finalmente é apresentada a proposta de solução alternativa para o problema.

O capítulo IV é dedicado à solução do problema e no capítulo V são apresentados os resultados obtidos nos casos considerados. Finalmente, no capítulo VI são apresentadas as conclusões do trabalho.

## CAPÍTULO II

### SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA MONOFÁSICA DE FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

#### 2.1 - Introdução

Observando o desenvolvimento da tração elétrica alcançado ao longo do tempo é possível distinguir, considerando o tipo de eletrificação usada, três modalidades diferentes de sistemas, na ordem cronológica em que foram concebidos:

- Sistemas eletrificados em corrente contínua.
- Sistemas eletrificados em corrente alternada de frequência especial.
- Sistemas eletrificados em corrente alternada de frequência industrial.

O início da eletrificação da tração ocorreu com a utilização de tensão contínua como forma de alimentação da linha de contato. Esse sistema permite a utilização direta do motor de corrente contínua, cujas características são muito adequadas para a tração elétrica. Porém, por questões tecnológicas, a tensão que alimenta um motor de corrente contínua não pode ser elevada. Como, num sistema de tração, as potências envolvidas são elevadas, resulta a necessidade de correntes contínuas elevadas. Para enfrentar o problema de regulação de tensão, tem-se duas possibilidades: promover um aumento das seções transversais dos cabos que compõem o sistema aéreo de alimentação ou aumentar o número de subestações ao longo do percurso. Qualquer uma dessas soluções é muito onerosa à implementação de um sistema desse tipo. Portanto, a instalação futura de um sistema eletrificado em corrente contínua, face a

alternativas mais adequadas presentemente existentes, é um problema que só se justifica em razão de outras considerações técnicas [1].

Os sistemas eletrificados em corrente alternada de frequência especial surgiram da necessidade de contornar os problemas detectados na utilização de corrente contínua. Colocando-se um transformador a bordo da locomotiva, foi possível realizar o desacoplamento entre a tensão presente na linha de contato e a tensão requerida pelo motor. Assim o nível da tensão colocada na linha de contato pôde ser alterado, reduzindo a queda de tensão que, por sua vez, permitiu a redução das secções transversais dos cabos do sistema aéreo e aumentou o espaçamento entre as subestações. No entanto, para esse sistema, passou-se a usar o motor monofásico série a coletor que, para funcionar com frequências de  $16 \frac{2}{3}$  Hz ou 25 Hz, precisou ter aperfeiçoado seu processo de comutação. A idéia de utilizar diretamente a frequência industrial (50 Hz ou 60 Hz) sempre esteve em cogitação, em função dos problemas envolvidos com o uso de frequência especial. Mas esse motor, que teve de substituir a máquina de corrente contínua, sempre inviabilizou o uso da frequência industrial na catenária [1].

Os sistemas eletrificados em corrente alternada de frequência industrial começaram a ganhar força a partir da segunda metade deste século, com a utilização de conversores estáticos a semicondutores de potência. No princípio eram utilizados retificadores de arco de mercúrio, depois, no fim dos anos 60, passou-se a utilizar retificadores a semicondutor. A utilização desse sistema de tração se consolidou, portanto, com o advento dos tiristores de potência, iniciando uma nova era para os veículos de tração elétrica com tensão monofásica de frequência industrial [2].

## 2.2 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Tração

O sistema de tração eletrificado em corrente alternada monofásica de frequência industrial, a ser considerado neste trabalho, é apresentado na figura 2.1.

O pantógrafo P da locomotiva é alimentado pela linha de contato LC que usualmente tem uma tensão de 25 kV ou 50 kV, onde a mais utilizada é 25 kV. Por sua vez, a linha de contato se liga ao secundário do transformador de uma das subestações SE do sistema de tração. As subestações do sistema de tração são as responsáveis pela adequação do nível de tensão entre a rede pública de fornecimento de energia e a linha de contato. Para o caso em que a linha férrea não se situa próxima à rede pública, é necessário a construção de uma linha de alta tensão AT para realizar a conexão entre ambas. Os níveis de tensão mais utilizados no lado de AT são 138 kV e 230 kV.

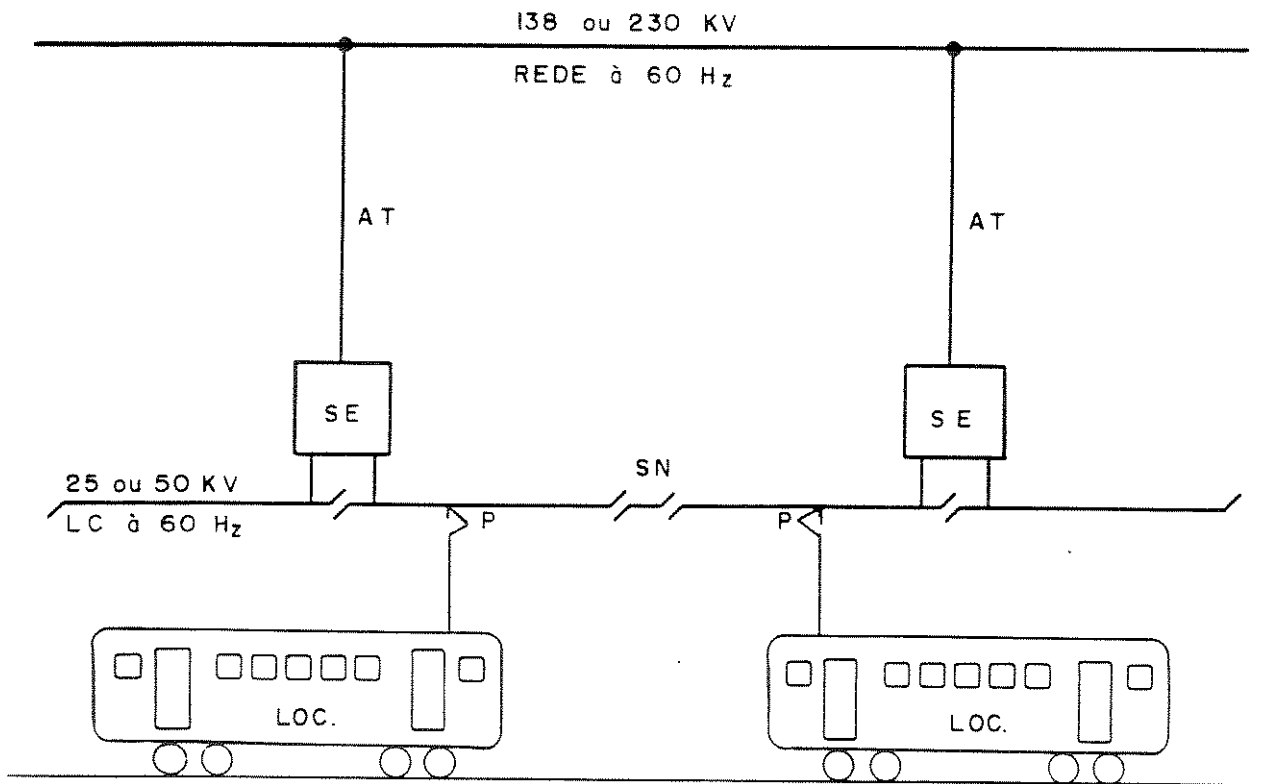


fig. 2.1 - sistema de tração elétrica c.a.

Observe-se na figura 2.1 que a rede pública (AT) de alta tensão tem a mesma frequência que a catenária (LC) cuja tensão, sendo mais alta que a da eletrificação em corrente contínua, propicia menor custo e menor peso para o sistema de alimentação de tração. Um transformador a bordo da locomotiva fornece, após retificação, o nível de tensão adequado aos motores de tração (usualmente de corrente contínua).

A tensão da catenária deve ser escolhida em função de diversas considerações em relação ao tipo de ferrovia a ser eletrificada. Grosso modo, as distâncias poderiam ser aumentadas quatro vezes com a utilização de 50 kV, mantendo-se a mesma regulação de tensão verificada em 25 kV, considerando-se que ao dobrar a tensão na linha de contato a corrente nesta se reduz à metade. Estudos mostram que para ferrovias de transporte de minérios os comprimentos das seções de 50 kV podem ser da ordem de três vezes o comprimento de uma seção de 25 kV equivalente, sem precisar impor qualquer restrição adicional na operação do tráfego [3]. No entanto, os problemas com distorção da forma de onda da tensão da catenária são mais acentuados quando se usa 50 kV. Daí a preferência por 25 kV nas ferrovias situadas em áreas não isoladas.

### 2.3 - Princípio de Funcionamento da Locomotiva

Nos sistemas eletrificados em corrente alternada monofásica de frequência industrial são utilizadas locomotivas cuja representação básica é apresentada na figura 2.2.

Um transformador abaixador T absorve pelo primário, através do pantógrafo P, a corrente fornecida pela linha de contato. O secundário do transformador, constituído de vários enrolamentos, fornece tensão alternada, em um nível compatível, para o conversor CA/CC. Esse conversor, composto por uma ou mais pontes retificadoras PR ligadas em cascata, alimenta, por meio de um reator de alisamento Ra, a armadura do motor de tração. É preciso ressaltar que todos os conversores e todos os motores existentes num modelo real estão representados na figura 2.2 por apenas um conversor e um motor. A resistência Rm e a indutância Lm representam as características elétricas do motor equivalente.

Existem ainda outros enrolamentos secundários no transformador para a alimentação das bobinas de campo do motor e de circuitos auxiliares.

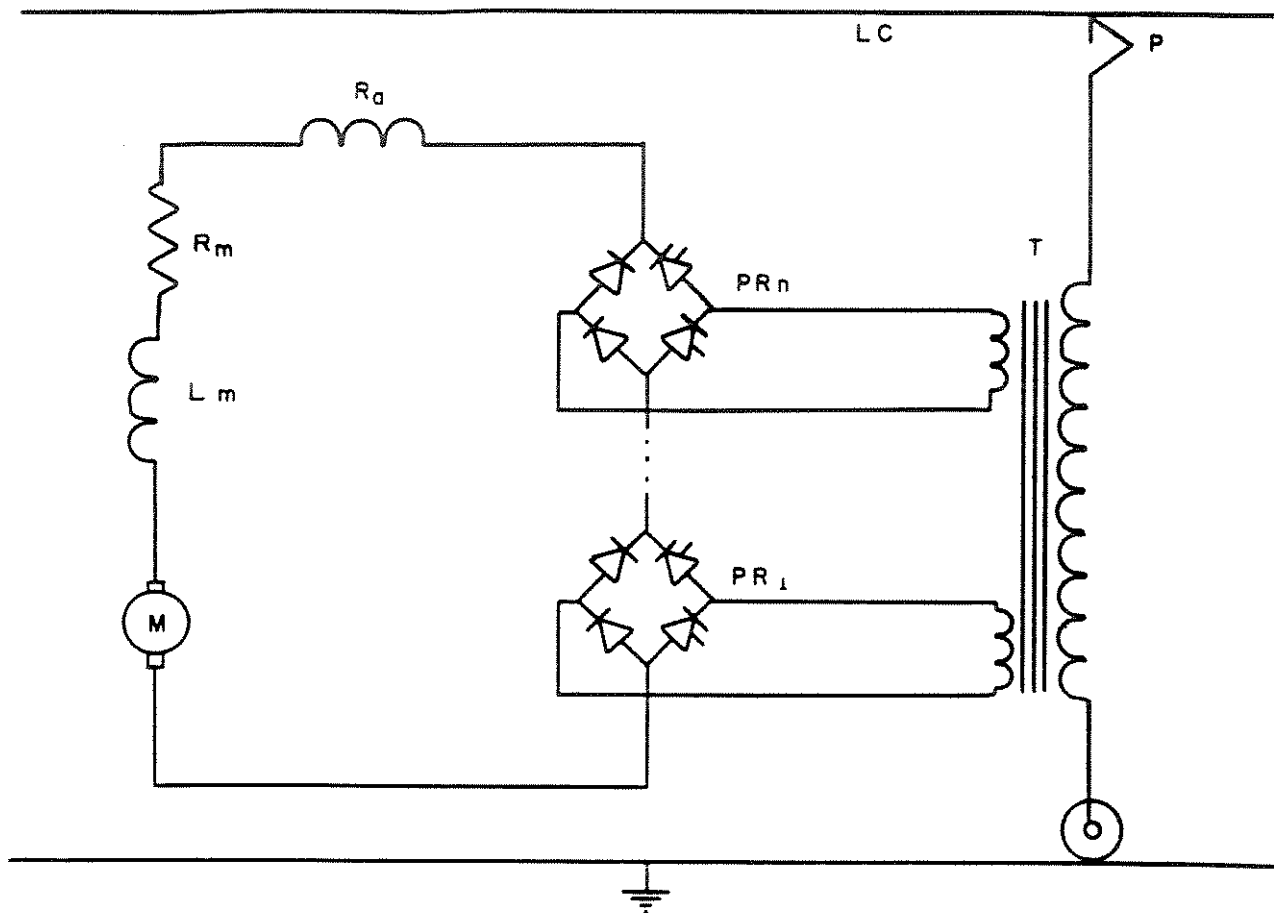


fig. 2.2 - Representação da locomotiva

#### 2.4 - Desempenho do Motor de Tração

Para que um trem possa ser acelerado até a velocidade requerida, os motores de tração precisam produzir um conjugado intenso, o qual deve ser mantido sob controle durante a aceleração.

O motor série de corrente contínua sempre desempenhou um papel importante no acionamento de tração elétrica. Alimentado a partir de corrente contínua essencialmente constante disponível na catenária, esse motor desenvolve seu conjugado a partir da corrente que absorve da mesma. Como é desejável um conjugado constante durante a aceleração da composição, a corrente do motor não deve variar durante o processo. Obtém-se esse controle chaveando resistências no circuito de armadura do motor de modo que mais tensão possa ser aplicada ao motor, à medida que este vai

sendo acelerado, sem que a corrente possa variar muito, comprometendo o conjugado necessário para a aceleração. Como se utiliza chaveamento discreto, não se consegue manter constante a corrente, conseguindo-se apenas que a mesma oscile abaixo e acima do valor médio necessário para produzir o conjugado desejado. Quando o controle pode ser feito em condições ideais, a corrente de armadura do motor fica constante e, portanto, a excitação do motor não varia durante o processo. Com o desenvolvimento, no final dos anos 60, dos semicondutores de potência, passou a ser possível fazer um ajuste muito fino (não mais discreto, mas contínuo) da tensão aplicada ao motor.

Usando-se um controle em malha fechada que monitora a corrente de armadura mantendo-a sempre muito próxima da corrente selecionada para a aceleração, às custas de uma variação muito fina da tensão aplicada, tornou-se possível substituir a máquina série pela máquina de corrente contínua com excitação independente. Essa máquina, operando com excitação constante, estará se comportando como uma máquina série. Porém, a corrente de armadura não mais experimenta saltos, com repercussões indesejadas no conjugado desenvolvido, mas fica essencialmente constante porque a tensão aplicada ao motor pode ser ajustada continuamente durante a aceleração da composição.

O motor de tração utilizado pela grande maioria dos sistemas de tração eletrificados em corrente alternada monofásica de frequência industrial é, a máquina de corrente contínua adaptada para operar em corrente pulsada. A opção pela utilização dessa máquina se deu, como nos primórdios da tração elétrica, por ela possuir a propriedade de trabalhar com pesadas sobrecargas de conjugado e também por suportar regimes de partida bastante severos. Embora os custos iniciais bem como os custos de manutenção dessa máquina, sejam maiores do que outras alternativas, o motor de corrente contínua se adapta melhor às exigências de cargas tipo tração.

O aprimoramento dos retificadores controlados a estado sólido com capacidade para operarem sob potências elevadas,

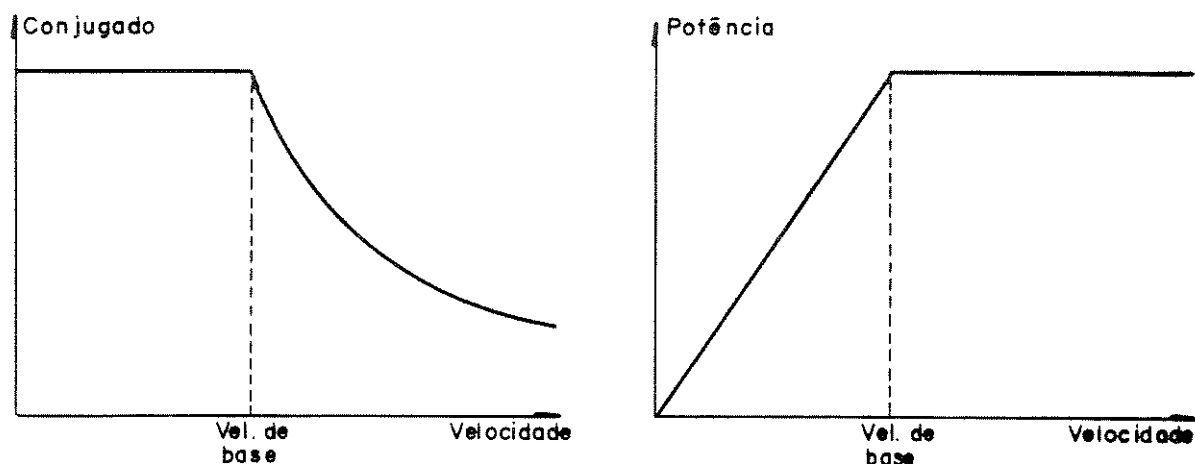


locidade para serem aplicadas na tração elétrica. A técnica para se efetuar o controle com precisão da velocidade é a que utiliza os métodos combinados de controle por tensão de armadura e por controle de campo do motor de corrente contínua. Com a utilização de dispositivos eletrônicos na implementação de tal técnica, a excitação do campo é feita separadamente do circuito de armadura.

Por meio desse controle eletrônico duplo, as velocidades abaixo da velocidade de base são obtidas por controle da tensão de armadura, ao passo que as velocidades acima da velocidade de base podem ser alcançadas pelo controle do campo do motor.

Com o objetivo de fazer a locomotiva acelerar desde o repouso até a velocidade de base, o circuito eletrônico de controle atua sobre o conversor CA/CC ajustando uma tensão de saída adequada para circular uma corrente no circuito de armadura do motor, cuja intensidade escolhida pelo operador, deverá ser mantida constante pelo sistema de controle durante a aceleração da locomotiva. Durante esse período, o motor de tração opera com uma condição de conjugado constante, figura 2.3a. Acima da velocidade de base a locomotiva é acelerada pelo enfraquecimento de campo. Inicialmente a corrente de campo é controlada a fim de manter a corrente de armadura constante até que o campo tenha sido enfraquecido ao limite que o motor de tração pode suportar, devido às considerações de comutação. Durante esse período o motor de tração opera com uma característica de potência constante, figura 2.3b. Posteriormente a corrente de armadura pode até precisar ir sendo diminuída à medida que o campo for ficando menos intenso.

Mesmo na fase em que a velocidade do motor vai aumentando, pela redução do campo, o uso da moderna metodologia de controle da máquina, utilizando eletrônica de potência, permite efetuar essas variações de velocidade sem que ocorram solavancos -originados na máquina série pelas variações bruscas no conjugado- em razão de controle discreto da corrente.



(a)

(b)

fig. 2.3 - características limites de conjugado e potência

As locomotivas CA, com a finalidade de alimentar os motores CC de tração, podem abrigar internamente diversos conversores CA/CC constituídos por pontes assimétricas semi-controladas a tiristor, ligadas em cascata, como mostra o esquema da figura 2.2. A opção pelo uso de conversores compostos por vários estágios retificadores em cascata prende-se ao fato dessa configuração ser bastante favorável no que diz respeito à uma melhora do fator de potência bem como da redução de interferências eletromagnéticas em circuitos próximos à linha de contato [1]. Usualmente as locomotivas em operação comportam conversores com retificação assimétrica semi-controlada a tiristor de vários estágios. A configuração mais simples para estágios em cascata possui duas pontes. A figura 2.4a ilustra um conversor com essas características. Operando nesse esquema só é possível obter frenagem no modo reostático.

Para o caso em que houver a necessidade de se efetuar frenagem regenerativa deve-se utilizar pontes retificadoras totalmente controladas. A figura 2.4b configura uma ponte desse tipo cuja composição é toda feita por tiristores.

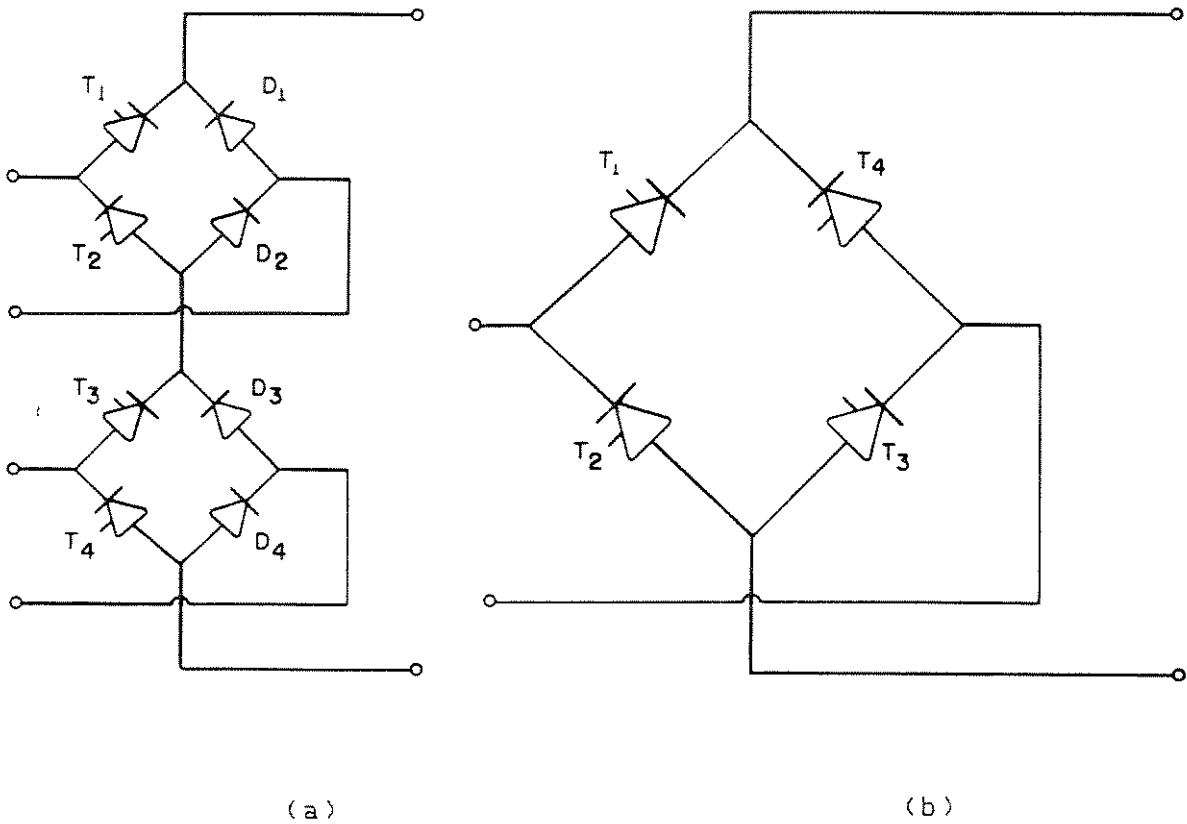
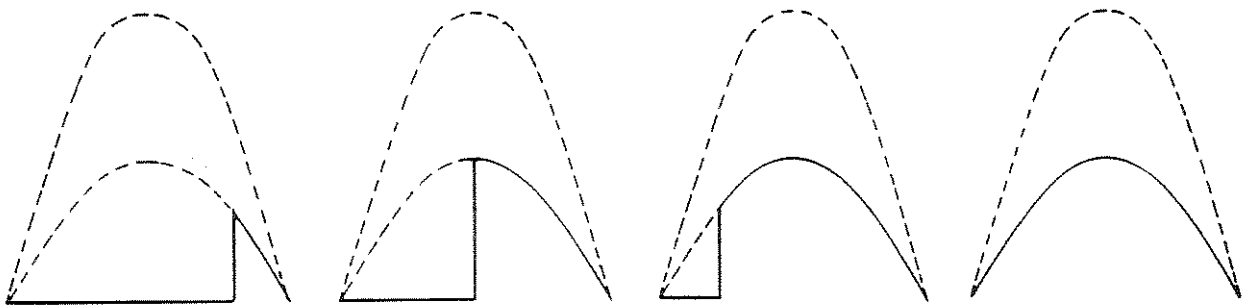
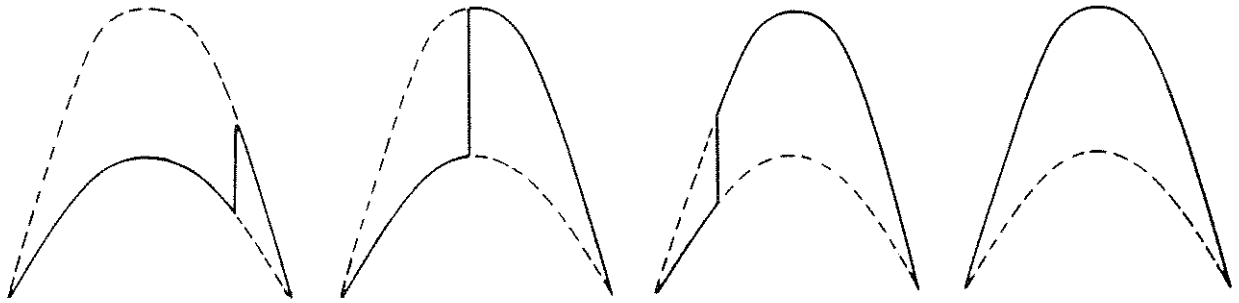


fig. 2.4 - configurações de pontes retificadoras a tiristor

Considere-se a utilização do conversor da figura 2.4a para o período em que os motores que aceleram a locomotiva operam com excitação constante (campo pleno). A sequência com que os tiristores são gatilhados, com a finalidade de fornecer tensão à armadura do motor, compreende dois estágios. No primeiro estágio, uma das pontes não é disparada, por exemplo a ponte superior, enquanto que a ponte inferior tem os ângulos de disparo ajustados para fornecer desde zero até metade da tensão nominal da armadura do motor. Depois que a ponte inferior estiver fornecendo metade da tensão exigida, seus ângulos de disparo são fixados para essa condição e a ponte superior é disparada em sequência, até que apareça na saída do conversor a tensão plena em que os motores alcançam a velocidade de base. A figura 2.5 mostra as sequências de disparos para cada estágio descrito.



1º ESTÁGIO



2º ESTÁGIO

fig 2.5 - operação sequencial de um conversor de dois estágios

Uma comparação entre o uso de uma ponte retificadora de um único estágio e outra de dois estágios em cascata, para a mesma saída, é mostrada no apêndice A para chamar a atenção quanto a melhora do fator de potência

## 2.5 - Influência da Operação do Conversor Sobre a Forma de Onda da Corrente que Circula Pela Catenária

Como já mencionado, do ponto de vista do funcionamento das pontes retificadoras que compõem o conversor, existem dois modos distintos em que se procede a aceleração da locomotiva. Durante o primeiro, que vai até a velocidade de base, os ângulos de disparo dos tiristores são ajustados em sequência a fim de manter constante a corrente do motor de tração. Durante o segundo, que parte da velocidade de base em diante, as pontes assumem um comportamento parecido ao das pontes não controladas. A figura 2.6 exibe a influência da operação dos conversores sobre a forma de onda da corrente que circula pela catenária, para o primeiro modo de aceleração da locomotiva (campo pleno).

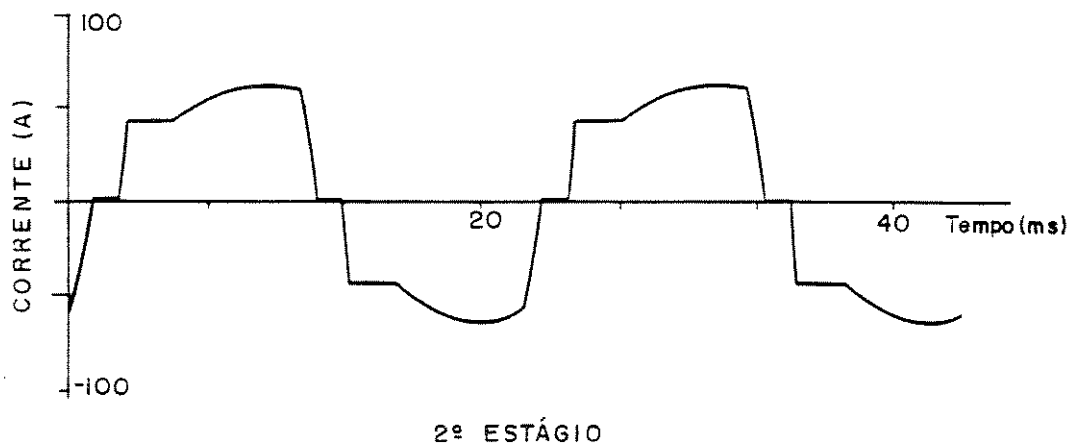
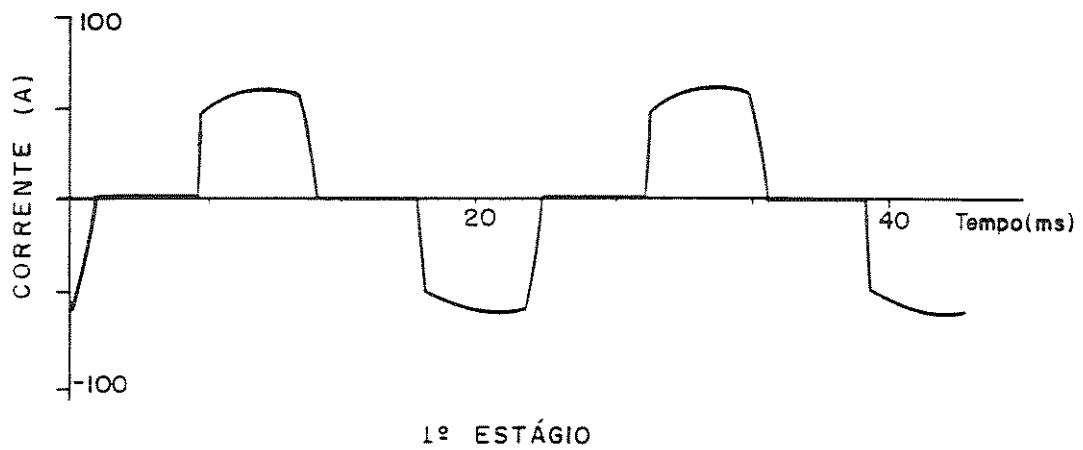


fig 2.6 - formas de onda da corrente da catenária

## 2.6 - O Aparecimento de Sobretensões na Catenária

Os problemas existentes em sistemas elétricos percorridos por correntes distorcidas cuja forma de onda aparece na figura 2.6, podem ser melhor compreendidos e analisados com o uso de correntes e tensões harmônicas. De acordo com a teoria de análise de Fourier, qualquer forma de onda periódica não senoidal é constituída de componentes harmônicas. Essas componentes podem ser representadas por uma série de Fourier. Quando uma corrente distorcida flui através de um sistema elétrico provoca o aparecimento de uma queda de tensão distorcida [4]. A presença dessa tensão distorcida no sistema de tração é indesejável porque pode acarretar alguns problemas [5], tais como: interferência eletromagnética nos circuitos localizados ao lado da via férrea à qual, como já visto, pode ser minimizada pelo uso de pontes retificadoras em

visto, pode ser minimizada pelo uso de pontes retificadoras em cascata ou, nos casos mais sérios através do uso dos denominados "booster transformers".

O sistema de tração elétrica monofásico de frequência industrial, objeto de estudo desse trabalho, compreende um sistema de transmissão de tração que é formado pelo transformador da subestação de tração e o equipamento aéreo responsável pelo fornecimento de energia à locomotiva. É certo que o equipamento aéreo de alimentação possui uma capacitância distribuída ao longo da linha de contato e assim, um circuito LC está formado. Portanto existe a possibilidade de que a corrente distorcida absorvida pela locomotiva venha a excitar ressonâncias nesse circuito e produzir tensões de alta frequência que irão colaborar para o aumento dos valores de pico da tensão presente nesse sistema de transmissão para tração. Como esse fenômeno, usualmente perdura por vários minutos, o que significa dizer que o conversor da locomotiva opera em condução parcial durante o mesmo, essa tensão de valor de pico aumentado, também vai persistir por vários minutos, sendo por isso denominada de sobretensão contínua [6]. A ocorrência de sobretensões é, portanto, um fenômeno presente apenas durante a fase em que a locomotiva vai sendo acelerada, com variação continuada dos ângulos de gatilhamento das pontes.

## 2.7 - Considerações Finais

O presente capítulo objetivou descrever a eletrificação para as catenárias que utiliza corrente alternada monofásica de alta tensão e frequência industrial. Eletrificação esta que reúne superioridade técnica e econômica em relação a outras alternativas e porisso esta sendo bastante utilizada e difundida por vários países do mundo.

Já em análise anterior, procurou-se enfatizar os meios mais utilizados para a realização do acoplamento necessário entre a tensão disponível na linha de contato e a tensão requerida para efetuar a alimentação dos motores de tração, bem como a melhor maneira para a realização da aceleração da composição.

Finalmente, procurou-se demonstrar de que maneira a operação do conversor age sobre a forma de onda da corrente que circula pela linha de contato, distorcendo-a. Além disso, discutiu-se como essa corrente distorcida ao circular pela linha de contato pode provocar o aparecimento de sobretensões e os problemas associados à essas.

No próximo capítulo passa-se ao estudo de modelos que podem ser estabelecidos para o equacionamento dos problemas levantados.

## CAPÍTULO III

### MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO DA TENSÃO DA LINHA DE CONTATO

#### 3.1 - Introdução

É de grande interesse que se possa, ainda na fase de projeto de um sistema elétrico de tração, obter meios para se fazer algum tipo de análise preliminar sobre o comportamento da tensão que estará presente na linha de contato. A finalidade desse procedimento é prever se a linha de contato, em situações tipicamente encontradas na prática, pode ficar sob o risco de sobreensões pois, como discutido no capítulo anterior, as distorções promovidas pelas locomotivas CA podem comprometer, de alguma forma, o desempenho do sistema elétrico de tração. O desenvolvimento de métodos de simulação, pela via analógica ou pela via digital, permite realizar esse tipo de investigação.

Qualquer que seja o tipo de estudo que se vá fazer no sistema de tração:

- comportamento da tensão da linha de contato;
- injeção de harmônicas na rede que alimenta o sistema de tração;
- análise de interferências eletromagnéticas em circuitos auxiliares;

torna necessária a obtenção da forma de onda da corrente, que é absorvida pela locomotiva da sua linha de alimentação.

As técnicas digitais utilizadas para a simulação, estão apoiadas na habilidade de se obter uma boa representação



para a locomotiva, permitindo expressar a corrente, distorcida em sua forma de onda, que a mesma retira da linha de contato. Desse modo, a locomotiva passa a ser vista como sendo uma fonte geradora de correntes harmônicas, tornando possível o cálculo das componentes da tensão presente na linha de contato, em qualquer posição da locomotiva ao longo do trecho desejado e também para quaisquer ângulos de disparo das pontes tiristorizadas. Isto se faz injetando esta corrente no sistema de alimentação.

Na simulação analógica, as resistências, indutâncias e capacitâncias do sistema real podem ser representadas por valores em escala desses mesmos parâmetros, num modelo físico. As pontes a tiristores da locomotiva também podem ser representadas por pontes a tiristores, no modelo. Dessa forma, os ângulos de disparo dos conversores da locomotiva podem ser ajustados manualmente e a forma de onda distorcida resultante na linha de contato pode ser observada através de medição. Naturalmente cada um dos dois tipos de abordagem deve ser utilizado segundo suas características mais interessantes, podendo inclusive serem metodologias complementares.

O presente capítulo tem por objetivo apresentar inicialmente alguns métodos de modelagem e simulação utilizados por pesquisadores da área bem como discutir suas características principais. Posteriormente, far-se-á uma introdução quanto à solução alternativa proposta neste trabalho, a qual é examinada em detalhe no capítulo IV.

### **3.2 - Simulação Digital - Representação por Equações e Funções**

Um modo de se efetuar a simulação digital de um sistema elétrico de tração, é valer-se de equações e funções que descrevem o comportamento das correntes absorvidas tanto pelo conversor quanto pelo motor de uma locomotiva C.A., sob diversas condições de interesse. De posse dessas equações e funções é possível, num computador digital, simular o funcionamento do sistema CA de tração, considerando as características do conversor utilizado para alimentar os motores de tração.

Em trabalho desenvolvido por Mellitt e Mwandosya [7], são apresentados três modelos de simulação da forma de onda da corrente de entrada de uma locomotiva C.A., cujo circuito equivalente mais simples é apresentado na figura 3.1. Nesse circuito, a alimentação da ponte é representada através de uma fonte de tensão alternada, com uma impedância série. O conversor utilizado é monofásico, semi-controlado e assimétrico. O motor de tração é representado por uma fonte correspondente à sua força contraeletromotriz desenvolvida e por um circuito RL série correspondente à resistência e indutância do circuito de armadura.

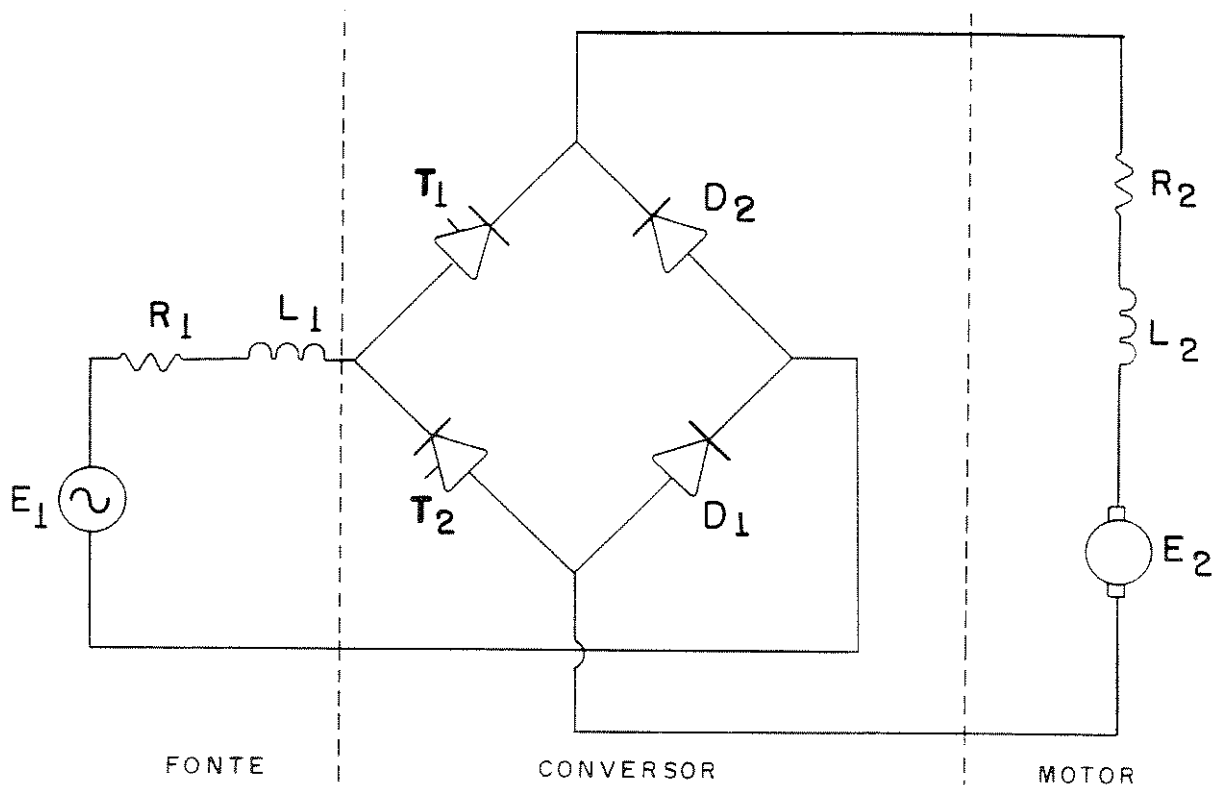


fig. 3.1 - circuito equivalente

### 3.2.1 - Modelo de Corrente Constante

Em primeira aproximação, a corrente do motor de tração da locomotiva pode ser considerada constante. As oscilações ("ripple") que a corrente apresenta são devidamente controladas através de bobinas de alisamento colocadas em série no circuito de armadura dos motores. Como as oscilações em torno de 30% de pico a pico são razoavelmente típicas, a escolha de um modelo em que a corrente de motor é assumida, vai exigir uma bobina de alisamento

fora de propósito. No entanto, quando o objetivo é estudar sobre-tensões na linha de contato, estudos realizados por Morrison [6], demonstraram que a hipótese de corrente constante para o motor de tração não vai implicar em resultados fora da realidade para a tensão da linha de contato. Isto é, não há muita discrepância quanto aos picos observados na mesma.

Se a corrente do motor for considerada constante, o modelo para a locomotiva fica bastante simplificado sem que a precisão dos resultados fique muito afetada.

Considerando então, a corrente do motor como sendo constante, no primeiro modelo, chamado modelo de corrente constante, a forma de onda da corrente de entrada é constante para  $\alpha < x < \pi$ , onde  $\alpha$  é o instante em que ocorre o gatilhamento do tiristor e  $n$  é a ordem da harmônica da corrente. O valor eficaz dessa corrente, nesse intervalo, é dado por:

$$I = \frac{2 \cdot I_d}{\pi} \sqrt{\sum_{n=1}^{n=h} (1 + \cos n\alpha) / n^2} \quad (3.1)$$

O valor eficaz da  $n$ -ésima harmônica de corrente é:

$$I_n = \frac{2 \cdot I_d}{\pi} \sqrt{(1 + \cos n\alpha) / n^2} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 - Modelo com Impedância de Fonte Zero

Esse modelo, em seu equacionamento, despreza os valores concebidos para a impedância da fonte do circuito da figura 3.1 e assim, as equações são apresentadas em termos dos parâmetros da impedância  $R_2$  e  $L_2$  do motor, do ângulo de disparo dos tiristores, da tensão da fonte e da tensão de armadura do motor.

Para esse modelo, a forma de onda da corrente de entrada é representada por um único segmento que está associado ao período principal de condução dos tiristores. Esta situação corresponde à configuração da ponte retificadora indicada na figura 3.2.

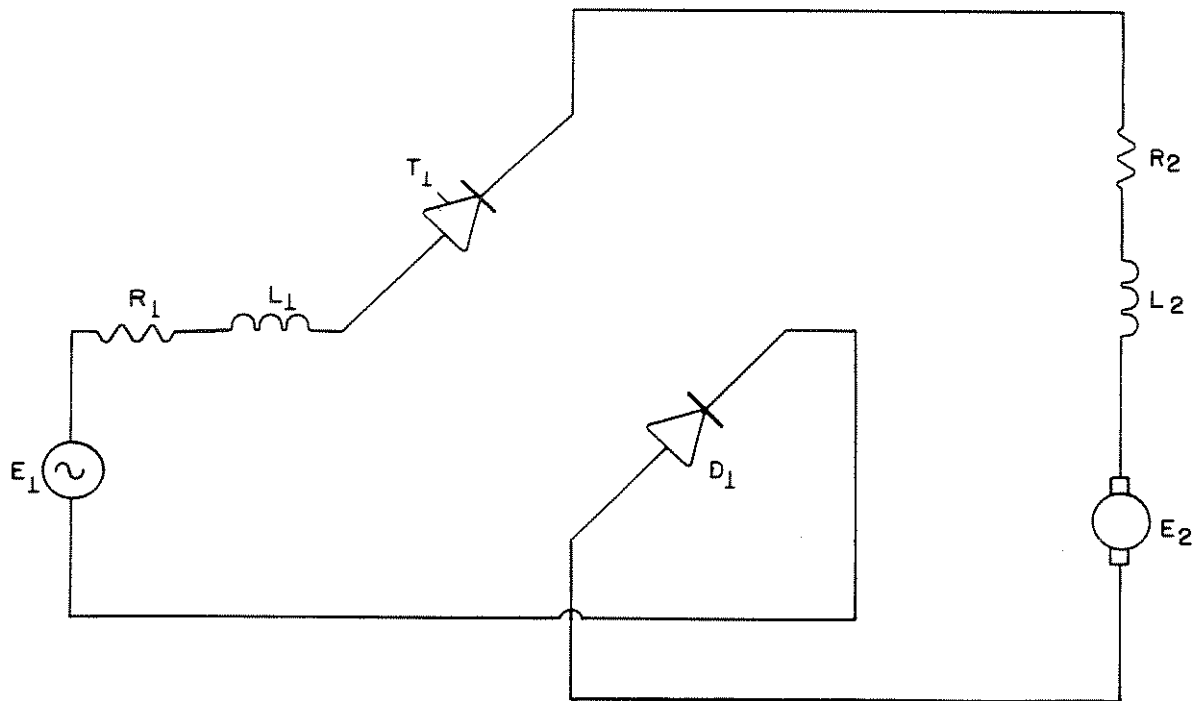


fig. 3.2 - configuração correspondente ao período  $\alpha < x < \pi$

com base na figura 3.2, pode-se escrever a equação diferencial:

$$\frac{di_a(x)}{dt} + \frac{R_2}{L_2} i_a(x) = \frac{E_1}{L_2} \text{sen}(\omega t + \alpha) - \frac{E_2}{L_2} \quad (3.3)$$

cuja solução é dada por:

$$i_a(x) = k_2 \left[ \left\{ \cos \phi_2 \text{sen}(x - \phi_2) - p \right\} - e^{\left\{ (\alpha - x) / d_2 \right\}} \left\{ \cos \phi_2 \text{sen}(\alpha - \phi_2) - p \right\} \right] + I_0 e^{\left\{ (\alpha - x) / d_2 \right\}} \quad (3.4)$$

onde:

$$k_2 = \frac{E_1}{R_2}$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$$

$$d_2 = \tan \phi_2$$

$$p = \frac{E_2}{E_1}$$

$$x = \alpha + \omega t$$

Entretanto, a corrente que circula pelo motor possui dois segmentos distintos. Um segmento, válido para o intervalo  $\alpha < x < \pi$ , expressa a mesma corrente descrita para a corrente de entrada. O outro segmento, válido para o período compreendido entre  $0 < x < \alpha$ , representa a corrente que circula pelo circuito formado pelos diodos e o motor. Esta situação corresponde à configuração da figura 3.3 onde a fonte de alimentação está desconectada do motor.

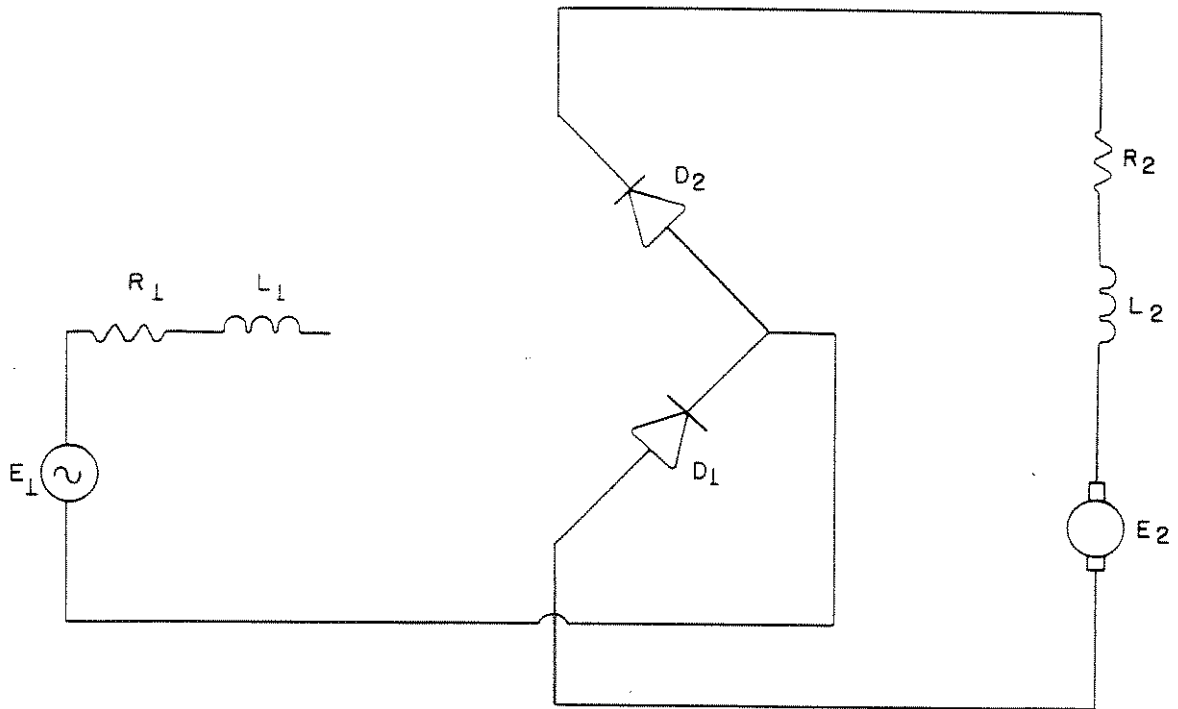


fig. 3.3 - configuração correspondente ao período  $0 < x < \alpha$

De forma análoga, pode-se escrever uma equação diferencial para o circuito da figura 3.3, cuja solução é a corrente  $i_1(x)$  que circula pelo motor e pelos diodos. A expressão para esse segmento é:

$$i_1(x) = I_1 e^{(-x)/d_2} - k_2 p \left\{ 1 - e^{(-x)/d_2} \right\} \quad (3.5)$$

O termo  $I_0$ , que aparece na equação 3.4, define o valor da corrente no circuito de armadura no exato instante em que o tiristor é disparado. Na equação 3.5, o termo  $I_1$  representa o valor da corrente no circuito de armadura no fim do período de condução do tiristor. Expressões para as correntes de entrada da ponte retificadora e para o motor podem ser encontradas se  $I_0$  e  $I_1$  puderem ser calculadas. Isto é possível pois se obtém um par de equações simultâneas fazendo-se:

$$i_a(x) = I_0, \text{ para } x = \alpha$$

$$i_a(x) = I_1, \text{ para } x = \pi$$

Um modelo mais apropriado para a corrente de pantógrafo é conseguido quando se considera a impedância da fonte. Neste caso os períodos de comutação dos semicondutores da ponte retificadora passam a ser considerados

### 3.2.3 - Modelo com Impedância de Fonte Finita

Se a impedância da fonte não é desprezada, as formas de onda da tensão de entrada, corrente de entrada, corrente do motor ficam mais próximas da realidade, conforme mostrado esquematicamente na figura 3.4.

A indutância da fonte introduz tempos finitos de comutação na forma de onda da corrente de entrada. Então, a forma de onda dessa corrente vista na figura 3.4c pode ser melhor estudada se dividida em três segmentos que correspondem a:

i) comutação do diodo do caminho de retorno, quando:

$$\alpha < x < \alpha + \mu_1 \quad (3.6)$$

ii) período principal de condução do tiristor de condução, quando:

$$\alpha + \mu_1 < x < \pi + \beta \quad (3.7)$$

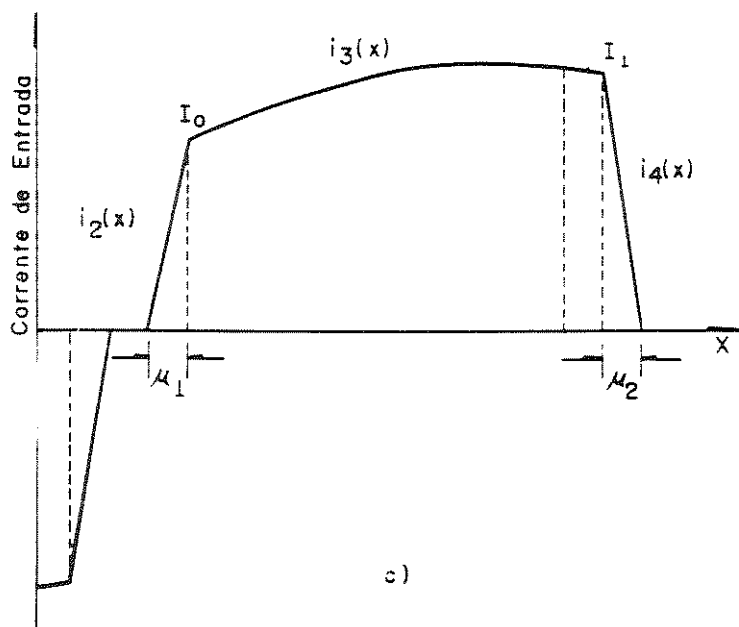
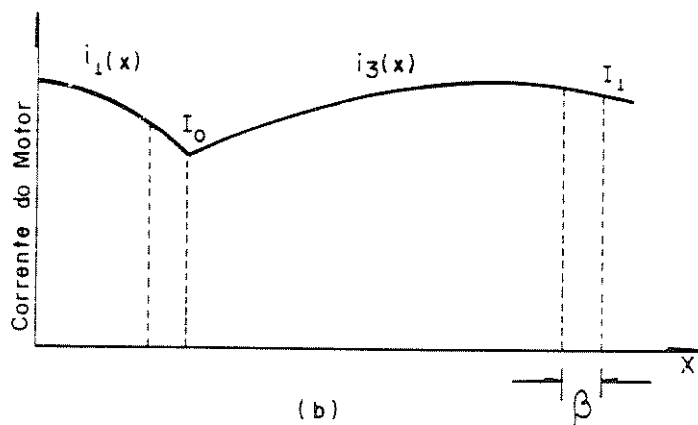
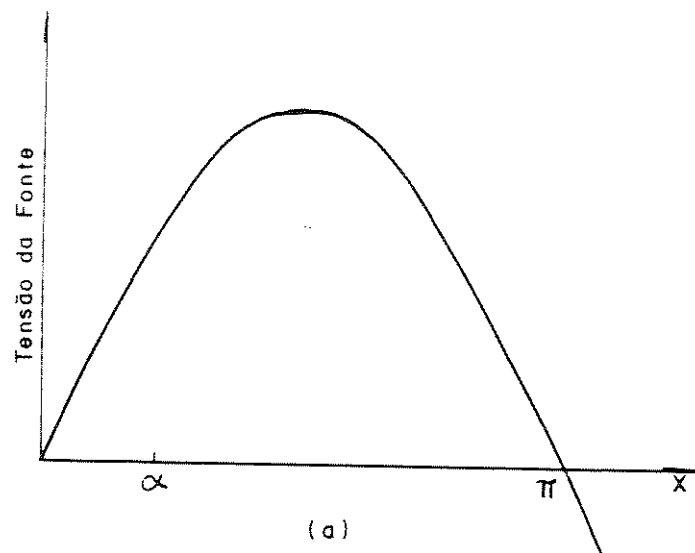


fig.3.4 - formas de ondas associadas à uma ponte simples

(iii) comutação do tiristor de condução quando:

$$\pi + \beta < x < \pi + \beta + \mu_2 \quad (3.8)$$

onde:

$x$  é a variação angular do sinal da fonte ( $x = \omega t$ ),

$\alpha$  é um ângulo que representa o instante de disparo do tiristor de condução;

$\mu_1$  é um ângulo associado ao tempo que é exigido para a corrente na linha variar desde zero até o valor de corrente  $I_0$ , valor este já estabelecido no circuito do motor;

$\beta$  é o ângulo com o qual é possível medir o intervalo de tempo necessário para o diodo  $D_2$  ficar diretamente polarizado, quando então, a tensão instantânea de entrada torna-se igual à queda de tensão sobre a impedância da fonte;

$\mu_2$  é o ângulo que exprime o tempo que a corrente de entrada leva para cair de um determinado valor  $I_1$  para zero.

No modelo anterior em que a impedância da fonte é desprezada os ângulos de comutação  $\mu_1$  e  $\mu_2$  não aparecem porque os semicondutores são considerados ideais. No modelo de corrente constante para o motor (bobina de alisamento muito grande em série com o circuito de armadura)  $i_a(x)$  é um segmento plano (não há a oscilação mostrada na figura 3.4c), além de  $\mu_1$  e  $\mu_2$  serem nulos.

### 3.3 - Equacionamento do Circuito Onde a Impedância da Fonte é Considerada

#### 3.3.1 - Corrente na Entrada da Ponte Retificadora

As equações que regem o comportamento da corrente de entrada da ponte, considerando os segmentos definidos anteriormente, são as seguintes:

##### a) Comutação do Tiristor

No exato instante em que o tiristor é disparado, a fonte fica curto-circuitada devido ao diodo do caminho de retorno estar conduzindo. Tem-se, então, a seguinte equação válida para o



período dado por  $\mu_1$ :

$$L_1 \frac{di_2}{dt} + R_1 i_2 = E_1 \sin(x + \alpha) \quad (3.9)$$

Resolvendo a equação acima para  $i_2(x) = 0$  quando  $x = 0$ , tem-se:

$$i_2(x) = k_1 \left[ \cos \phi_1 \sin(x - \phi_1) - e^{\left\{ (\alpha - x) / d_1 \right\}} \cos \phi_1 \sin(\alpha - \phi_1) \right] \quad (3.10)$$

onde:

$$k_1 = \frac{E_1}{R_1}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L_1}{R_1} \right)$$

$$d_1 = \tan \phi_1$$

b) Período Principal de Condução

Tão logo cesse a comutação do tiristor e este passe a conduzir plenamente, a equação que exprime a corrente de entrada durante o segmento correspondente ao período principal de condução é a seguinte:

$$(L_1 + L_2) \frac{di_3}{dt} + (R_1 + R_2) i_3 = E_1 \sin(x + \alpha + \mu_1) - E_2 \quad (3.11)$$

É necessário ressaltar que o período de condução principal ultrapassa o ângulo  $\pi$  no valor de  $\beta$ , quando só então inicia-se o processo de comutação reversa.

A solução para a equação 3.11 é dada pela seguinte expressão.

$$\begin{aligned}
 i_o(x) = k_{12} & \left[ \left\{ \cos \phi_{12} \sin(x - \phi_{12}) - p \right\} \right. \\
 & \left. - e^{\left\{ (\alpha + \mu_1 - x) / d_{12} \right\}} \left\{ \cos \phi_{12} \sin(\alpha + \mu_1 - \phi_{12}) - p \right\} \right] \\
 & + I_o e^{\left\{ (\alpha + \mu_1 - x) / d_{12} \right\}}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

onde:

$$k_{12} = \frac{E_1}{R_1 + R_2}$$

$$\phi_{12} = \tan^{-1} \left( \frac{\omega(L_1 + L_2)}{R_1 + R_2} \right)$$

$$d_{12} = \tan \phi_{12}$$

$$p = \frac{E_2}{E_1}$$

### c) Comutação Reversa

Com a inversão no sinal da tensão da fonte, o diodo do caminho de retorno aplica uma tensão inversa em  $T_1$ , fazendo-o deixar de conduzir no tempo associado ao ângulo  $\mu_2$ , a corrente de entrada vai para zero de acordo com a equação.

$$\begin{aligned}
 i_a(x) = k_1 & \left[ \cos \phi_1 \sin(x_1 - \phi_1) - e^{\left\{ (\beta - x_1) / d_1 \right\}} \cos \phi_1 \sin(\beta - \phi_1) \right] \\
 & + I_o e^{\left\{ (\beta - x_1) / d_1 \right\}}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

onde:

$$x_1 = (x - \pi + \beta)$$

$k_1, \phi_1$  e  $d_1$  são os mesmos definidos para a equação 3.10

### 3.3.2 - Corrente do Circuito do Motor Durante a Comutação

Depois que a tensão passa por zero, decorrido um

tempo associado ao ângulo  $\beta$ , inicia-se o processo de extinção do tiristor que está conduzindo, como já mencionado anteriormente. A partir deste instante começa a se fechar o circuito de circulação livre, formado pelos diodos e pelo ramo do motor. Ao valor da corrente, nesse exato instante, foi dado o símbolo  $I_1$  e a equação que exprime a corrente no circuito do motor durante todo o processo de comutação dos tiristores é a seguinte:

$$i_1(x) = I_1 e^{\left\{(\beta-x)/d_2\right\}} - k_2 \left[ 1 - e^{\left\{(\beta-x)/d_2\right\}} \right] \quad (3.14)$$

onde:

$$k_2 = \frac{E_1}{R_2}$$

$$d_2 = \tan \phi_2$$

### 3.4 - Cálculo dos Ângulos de Comutação

Juntamente com os ângulos associados às comutações que ocorrem em um semi-ciclo,  $\mu_1, \mu_2$  e  $\beta$ , é necessário calcular os valores  $I_0$  e  $I_1$  da corrente de entrada. Integrando-se a equação 3.9 desde  $(\alpha + \mu_1)$  até  $(\pi + \beta)$  e integrando-se a equação 3.13 entre os limites  $\beta$  e  $(\alpha + \mu_1)$  obtém-se uma relação entre as variáveis de interesse e a corrente média do motor  $I_d$ . A equação 3.19, exhibe essa relação.

Usando a equação 3.19 juntamente com outras quatro equações, 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18, que podem ser obtidas tendo como base as equações 3.9, 3.10 e 3.14, chega-se a um conjunto de cinco equações simultâneas não-lineares contendo as variáveis de interesse citadas acima. Essas equações podem ser resolvidas, para um dado circuito de constantes conhecidas, usando um método iterativo apropriado.

As cinco expressões que formam o conjunto de equações simultâneas não-lineares para a obtenção de  $\mu_1, \mu_2, \beta, I_0$  e  $I_1$  são:

$$k_1 \left[ \cos \phi_1 \sin(\alpha + \mu_1 - \phi_1) - e^{\left\{ -\mu_1 / d_1 \right\}} \cos \phi_1 \sin(\alpha - \phi_1) \right] - I_0 = 0 \quad (3.15)$$

$$I_1 e^{\left\{ (\beta - \alpha - \mu_1) / d_2 \right\}} - k_2 \left[ 1 - e^{\left\{ (\beta - \alpha - \mu_1) / d_2 \right\}} \right] - I_0 = 0 \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} E_2 \sin \beta + \omega L_1 \left[ k_{12} \cos \phi_{12} \cos(\beta - \phi_{12}) + k_4 e^{\left\{ -(\beta + \pi) / d_{12} \right\}} \right] \\ + k_{12} R_1 \left[ p + \cos \phi_{12} \sin(\beta - \phi_{12}) - \frac{k_4}{k_{12}} e^{\left\{ -(\beta + \pi) / d_{12} \right\}} \right] \\ + I_0 \left\{ \frac{R_1 d_{12} + \omega L_1}{d_{12}} \right\} e^{\left\{ (\mu_1 + \alpha - \beta - \pi) / d_{12} \right\}} = 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

onde:

$$k_4 = k_{12} e^{\left\{ (\alpha + \mu_1) / d_{12} \right\}} \left[ p - \cos \phi_{12} \sin(\alpha + \mu_1 - \phi_{12}) \right]$$

$$\begin{aligned} I_1 e^{\left\{ \mu_1 / d_1 \right\}} - k_1 \left[ \cos \phi_1 \sin(\mu_2 + \beta - \phi_1) \right. \\ \left. - e^{\left\{ \mu_1 / d_1 \right\}} \cos \phi_1 \sin(\beta - \phi_1) \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} I_d + A_1 \left[ \cos(\pi + \beta - \phi_{12}) - \cos(\alpha + \mu_1 - \phi_{12}) \right] + A_2 (\pi + \beta - \alpha - \mu_1) \\ + (A_5 + A_6 I_0) \left[ e^{\left\{ -(\pi + \beta) / d_{12} \right\}} - e^{\left\{ -(\alpha + \mu_1) / d_{12} \right\}} \right] + A_8 (\alpha + \mu_1 - \beta) \\ + (A_7 I_1 + A_9) \left[ e^{\left\{ -(\alpha + \mu_1) / d_{12} \right\}} - e^{\left\{ -(\beta) / d_{12} \right\}} \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

onde:

$$A_1 = (k_{12} \cos \phi_{12}) / \pi$$

$$A_2 = -(k_{12} p) / \pi$$

$$A_3 = k_{12} e^{\left\{ (\alpha + \mu_1) \right\}} \left\{ p - \cos \phi_{12} \sin(\alpha + \mu_1 - \phi_{12}) \right\}$$

$$A_4 = -A_3 / (\pi d_{12})$$

$$A_5 = -(A_3 d_{12}) / \pi$$

$$A_6 = -(A_4 d_{12}) \pi$$

$$A_7 = \left\{ e^{(\beta/d_2)} \right\} / \pi$$

$$A_8 = -k_2 / \pi$$

$$A_9 = \left\{ k_2 e^{(\beta/d_2)} \right\} / \pi$$

Em pesquisa que concluiu em 1980, Miskulin [2] definiu uma série de configurações para representar o sistema elétrico de acionamento da locomotiva. Seu objetivo era descrever a corrente de entrada dos retificadores para fins de estudo dos procedimentos de proteção dos semicondutores das pontes. A figura 3.5 apresenta estas configurações, as quais vão se sucedendo uma a uma, a partir do instante de gatilhamento do tiristor  $T_1$ , durante o desenvolvimento de um ciclo completo da tensão de alimentação. A configuração (a), na figura 3.5, é imediatamente antecedida pela (h), na mesma figura.

Para caracterizar a duração de cada uma das configurações da figura 3.5, foram definidos intervalos de tempos correspondentes. Desta forma, os ângulos de sobreposição de semicondutores sendo gatilhados com outros que estão sofrendo comutação puderam ser devidamente considerados, como é o caso das configurações (a), (c), (e) e (g) na figura 3.5. No equacionamento que se realizou, Miskulin considerou cada retificador como sendo constituído de duas pontes assimétricas conectadas em cascata e operando na sequência de gatilhamento examinada no capítulo II. Também nesse caso foi obtido um conjunto de equações, as quais são soluções de equações diferenciais que caracterizam cada configuração, e cuja solução foi feita simultaneamente, tornando possível descrever a corrente de entrada nas pontes com o detalhamento exigido naquela pesquisa

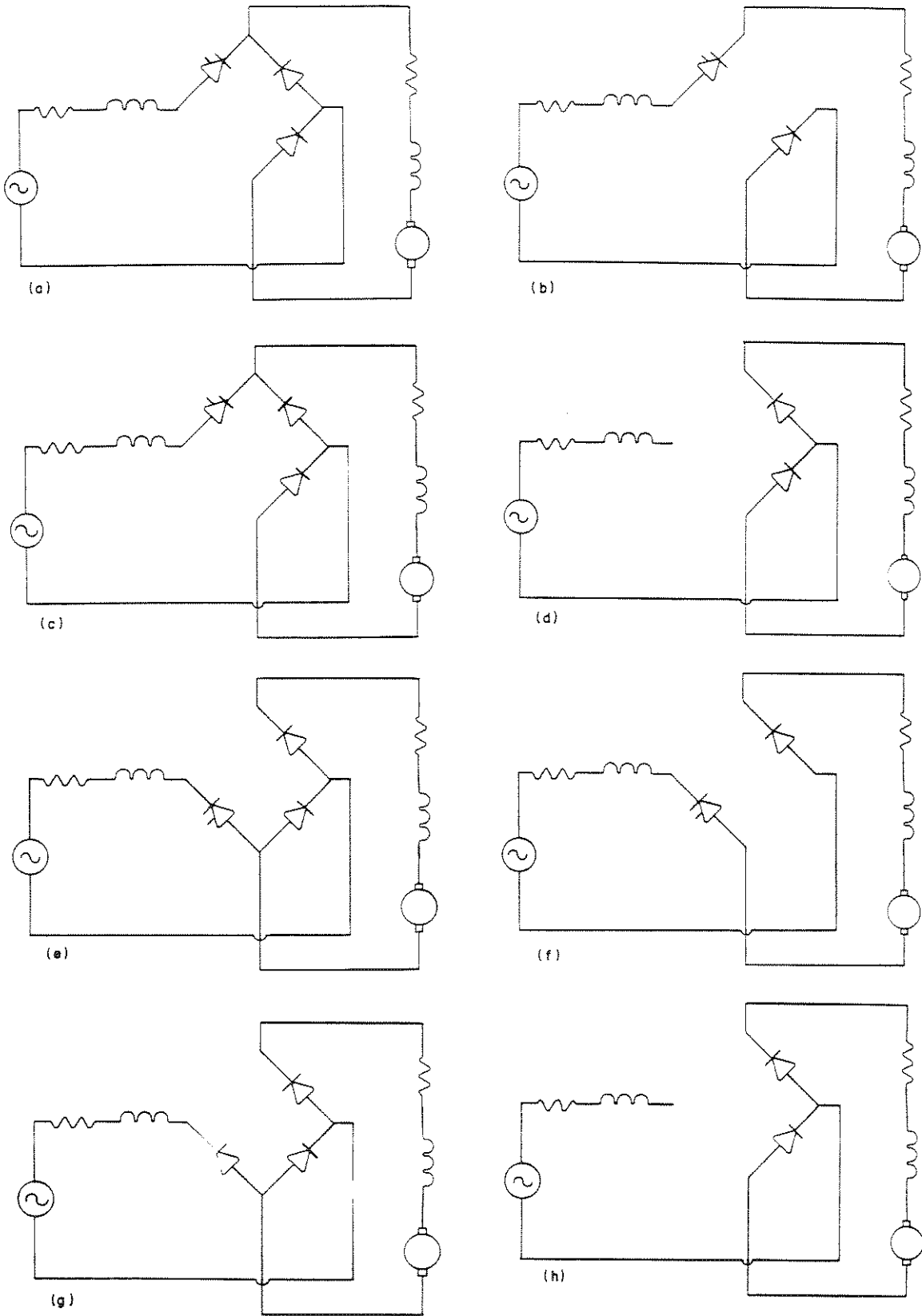


fig. 3.5 - configurações consideradas durante um ciclo da tensão

Não é propósito desse trabalho valer-se das mesmas metodologias discutidas nesse capítulo para visualizar o estudo de sobretensões na linha de contato. A forma de onda da corrente pantográfica será obtida a partir da saída de um pacote computacional capaz de simular o funcionamento do sistema de acionamento da locomotiva.

### **3.5 - Programa de Simulação Numérica Global de Conversores Estáticos**

A simulação numérica global dos conversores estáticos permite o estudo de qualquer circuito que contenha tiristor, transistor, diodo ou tiristor dual e pode ser realizada através de programa de computacional que utilize esta metodologia. O Simulador Automático de Conversores Estáticos Por Computador - SACEC, a ser usado nesta pesquisa, foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina no Laboratório de Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência [8]. A princípio, o SACEC não precisa conhecer os instantes de comutação nem tampouco a sequência dos estados de condução dos vários semicondutores. Os dados a serem fornecidos, resumem, tão somente, a configuração do sistema, valores dos parâmetros e ordem de gatilhamento dos tiristores.

O modelo de funcionamento adotado no SACEC para os diversos dispositivos a semicondutor é puramente resistivo (figura 3.6). Desse modo, para cada estado de um dado dispositivo semicondutor, é atribuída uma resistância que é determinada pela polaridade da tensão aplicada em seus terminais. Então, se para um diodo, a tensão aplicada em seus terminais for positiva, será atribuído a ele uma resistância de condução. Caso contrário, uma resistância de bloqueio será atribuída. Para um tiristor, somente será atribuída uma resistância de condução se a tensão for positiva em seus terminais e ainda se houver um sinal de gatilho.

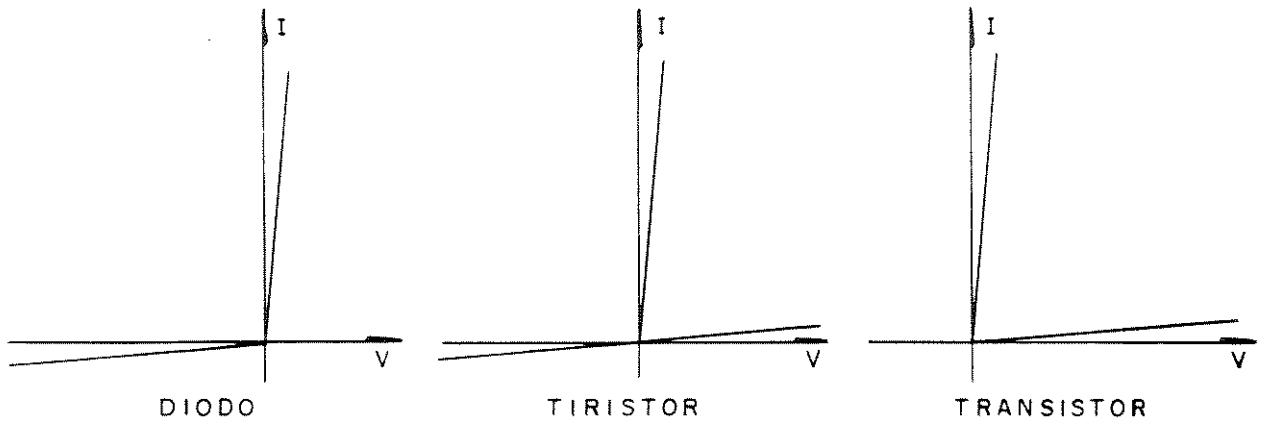


fig. 3.6 - características dos dispositivos semicondutores adotadas no SACEC

O programa SACEC de simulação compreende três partes principais, em termos de funcionamento:

- Fornecimento automático de equações;
- Resolução das equações de estado,
- Determinação das comutações.

O fornecimento automático de equações usa os resultados clássicos da teoria dos grafos. Considera-se o circuito em questão como um conjunto de arcos orientados ligando nós, formando um grafo. Determina-se uma árvore, isto é, um conjunto de ramos ligando todos os nós sem formar malhas. Os outros arcos são chamados ligações. A inclusão de uma ligação a uma árvore define uma malha onde pode circular uma corrente. A tensão de ligação para a mesma malha é imposta pelas tensões dos ramos da árvore.

Para a resolução das equações de estado, utiliza-se o método de exponencial de matriz que dá uma solução analítica do sistema de equações diferenciais. Como o modelo dos semicondutores é puramente resistivo, o sistema se torna linear entre duas mudanças de estado.



$$X(t+T) = e^{AT} \cdot X(t) + A^{-1} \cdot (e^{AT} - 1)BU \quad (3.20)$$

Da equação 3.20 ressalta-se que o passo de cálculo T não deve ser muito grande para que o cálculo da matriz exponencial não se torne menos preciso. Além disso, a determinação dos instantes de anulação da tensão (comutação) também é difícil. Por outro lado, um passo de cálculo muito pequeno, devido ao grande número de testes efetuados para cada passo, aumenta o tempo exigido para a simulação.

A determinação dos instantes de comutação é feita observando-se os instantes de anulação da tensão sobre um semicondutor. Assim, a cada passo de cálculo, faz-se um teste sobre a tensão no semicondutor para saber se esta não mudou de sinal desde o passo anterior. O método utilizado pelo SACEC para a determinação precisa do instante da passagem por zero é o seguinte: a partir do último ponto calculado (antes da mudança de sinal), os cálculos são refeitos, porém agora com um passo menor. Novamente, uma passagem por zero é detectada. Se o último valor calculado é inferior a um nível limite, ele é aceito e a mudança de estado vai ser feita nesse instante. Caso contrário, a operação será refeita.

Considerando que X, na equação 3.20, é um vetor de estado, pode-se obter então, a forma de estado clássica:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.21)$$

É possível também, exprimir qualquer tensão ou corrente a partir das variáveis de estado por uma relação da forma:

$$Y = CX + DU \quad (3.22)$$

### 3.6 - Obtenção da Corrente da Locomotiva Através do SACEC

A obtenção da corrente absorvida pela locomotiva através do programa SACEC, segue os passos descritos no item anterior. Isto é, inicialmente é preciso montar o circuito equivalente contemplando o conversor (seja para ponte simples ou dupla) e o

motor da locomotiva (representado apenas por uma resistência, uma indutância e uma fonte de tensão contínua).

Este circuito equivalente, com os nós devidamente numerados para a implementação no programa, aparece na figura 3.7. O capacitor presente no circuito da mesma figura, que originalmente não pertence ao circuito da locomotiva, foi ali colocado por uma exigência do programa, não acarretando nenhum prejuízo ao desenvolvimento da simulação. O programa automaticamente enumera os ramos na seguinte ordem:

- Fontes de tensão
- Capacitores
- Tiristores
- Diodos
- Transistores
- Resistores
- Indutâncias

Durante a simulação, as variáveis de estado do circuito estão contidas no vetor  $X(I)$ , com  $I = 1, \dots, n$ ; onde  $n$  é a ordem do sistema. No vetor  $Y(J)$  estão guardadas as tensões sobre os semicondutores (tiristores + diodos + transistores) e sobre as resistências. O vetor  $Z(J)$  armazena as correntes nos semicondutores e nas resistências.

Algumas estruturas têm necessidade de inicialização de algumas variáveis de estado a fim de reduzir o número de períodos do regime transitório. O programa permite, então, inicializar todas as variáveis de estado do circuito, embora isso nem sempre seja vantajoso. Por exemplo, a inicialização de uma variável de estado que corresponde a um indutor implica iniciar uma corrente em uma malha que deve estar fechada. Ou seja, se esta malha contiver um interruptor (controlado ou não) que no instante inicial ( $t=0$ ) da simulação assume um estado aberto, a inicialização em corrente sobre o indutor não tem sentido.

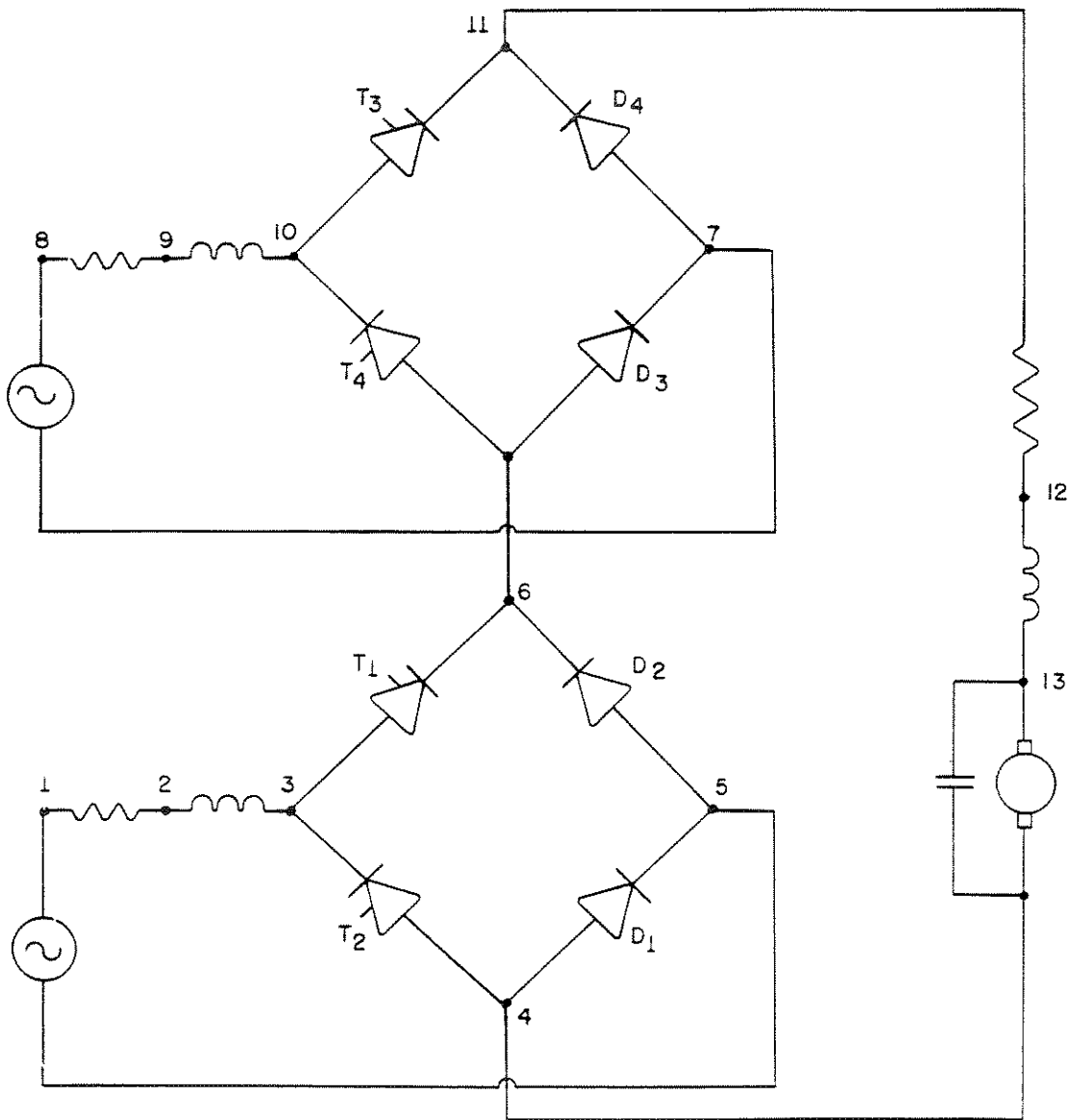


fig. 3.7 - circuito equivalente para o circuito da locomotiva

### 3.7 - Confrontação de Resultados de Simulação e Experimentais

Para certificar-se de que o SACEC pode realmente ser aplicado ao estudo em questão, este programa foi utilizado na simulação do sistema de acionamento da locomotiva (figura 3.8) com o objetivo de comparar características da corrente da locomotiva, obtida por este método, com resultados de medição de laboratório realizadas por Miskulin [2].

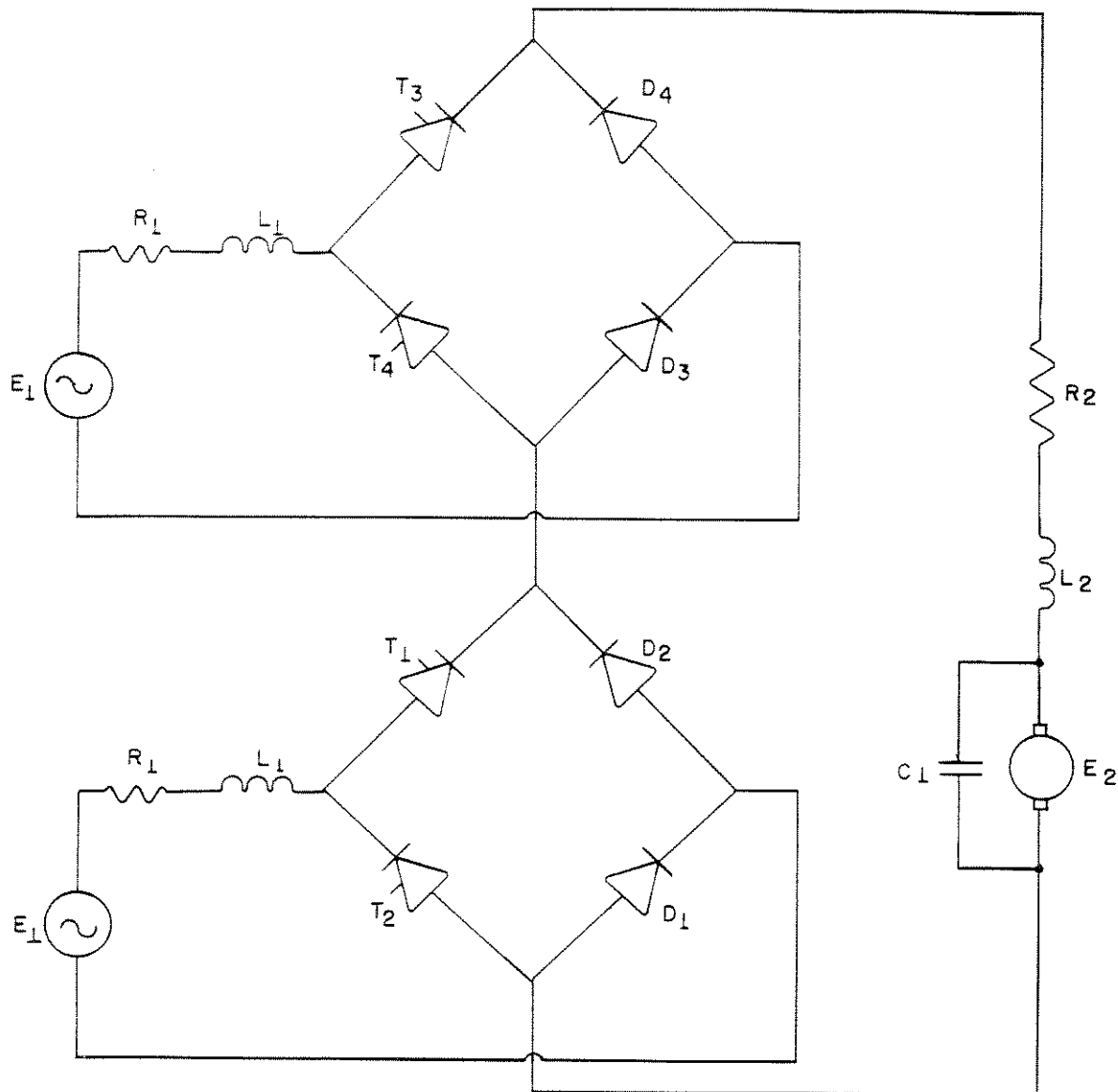


fig. 3.6 - sistema de tração utilizado para comparação de resultados

O capacitor  $C_1$  não faz parte do modelo físico utilizado por Miskulin, porém, o SACEC exige que qualquer circuito a ser simulado por ele tenha pelo menos um capacitor. Desse modo, optou-se em adicionar um capacitor, de baixa capacitância, em paralelo com a fonte de tensão contínua.

A tabela 3.1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados na montagem experimental do sistema da locomotiva.

|                    |            |                    |            |           |           |
|--------------------|------------|--------------------|------------|-----------|-----------|
| $R_1$ ( $\Omega$ ) | $L_1$ (mH) | $R_2$ ( $\Omega$ ) | $L_2$ (mH) | $E_1$ (V) | $I_m$ (A) |
| 0.42               | 2.30       | 0.80               | 120.0      | 30.0      | 3.0       |

tab. 3.1 - parâmetros do sistema de tração equivalente utilizado na implementação

Na simulação realizada pelo SACEC, com os mesmos parâmetros da tabela 3.1, foram calculados os instantes  $t_1$ ,  $t_4$  e  $t_5$  definidos por Miskulin, desse modo:

$t_1$ : representa o instante em que o tiristor  $T_1$  começa o processo de condução plena, ou seja, o diodo  $D_2$  corta;

$t_4$ : representa o instante em que o diodo  $D_2$  fica diretamente polarizado atingindo seu ponto natural de condução, e;

$t_5$ : representa o instante em que o tiristor  $T_1$  está bloqueado e o diodo  $D_2$  conduz plenamente.

É importante salientar que o instante tomado como referência dos tempos  $t_1$ ,  $t_4$  e  $t_5$  é o gatilhamento do tiristor  $T_1$ .

A tabela 3.2 exibe algumas medições realizadas sobre o modelo analógico. A configuração utilizada para obter esses resultados possui uma ponte totalmente em atraso, o que significa dizer que ela está com um gatilhamento em  $180^\circ$ , e a outra ponte com um gatilhamento em  $90^\circ$ .

A comparação entre os valores medidos e os valores calculados pelo SACEC é apresentada na tabela 3.2.

| RESULTADOS   | $t_1$ (ms) | $t_4$ (ms) | $t_5$ (ms) |
|--------------|------------|------------|------------|
| EXPERIMENTAL | 0.15       | 5.0        | 6.1        |
| SIMULAÇÃO    | 0.15       | 4.92       | 5.99       |

observação: ambos os modelos utilizam gatilhamentos em  $90^\circ$  e  $180^\circ$

tab. 3.2 - comparação de resultados experimentais e de simulação

### 3.8 - Considerações Finais

Sendo necessária a obtenção da forma de onda da corrente requerida pela locomotiva na sua linha de alimentação, este capítulo preocupou-se em apresentar meios para a obtenção desta corrente, bem como efetuar alguma discussão a respeito. Dentre os modelos discutidos, destaca-se que todos podem ser utilizados para efetuar-se o estudo em questão, desde que, ao proceder-se a análise dos resultados, as limitações de cada um sejam devidamente consideradas.

Para concluir, há de considerar-se que a metodologia empregada para a obtenção da forma de onda da tensão da linha de contato descarta a interação entre a locomotiva e o sistema de alimentação da tração.

## CAPÍTULO IV

### OBTENÇÃO DA FORMA DE ONDA DA TENSÃO DA LINHA DE CONTATO

#### 4.1 - Introdução

Qualquer um dos métodos examinados no capítulo anterior, permite obter a corrente que a linha de contato fornece à locomotiva. O presente capítulo visa obter a forma de onda da tensão estabelecida ao longo da linha de contato, em virtude da circulação dessa corrente. Considerando-se a locomotiva como uma fonte geradora de correntes harmônicas e injetando-se essas componentes no sistema de alimentação para tração, representado convenientemente por equações hiperbólicas no domínio da frequência, chega-se às correspondentes componentes harmônicas da tensão da linha de contato. Pode-se, então, compor a forma de onda da mesma.

#### 4.2 - Considerações Quanto a Representação da Linha de Contato

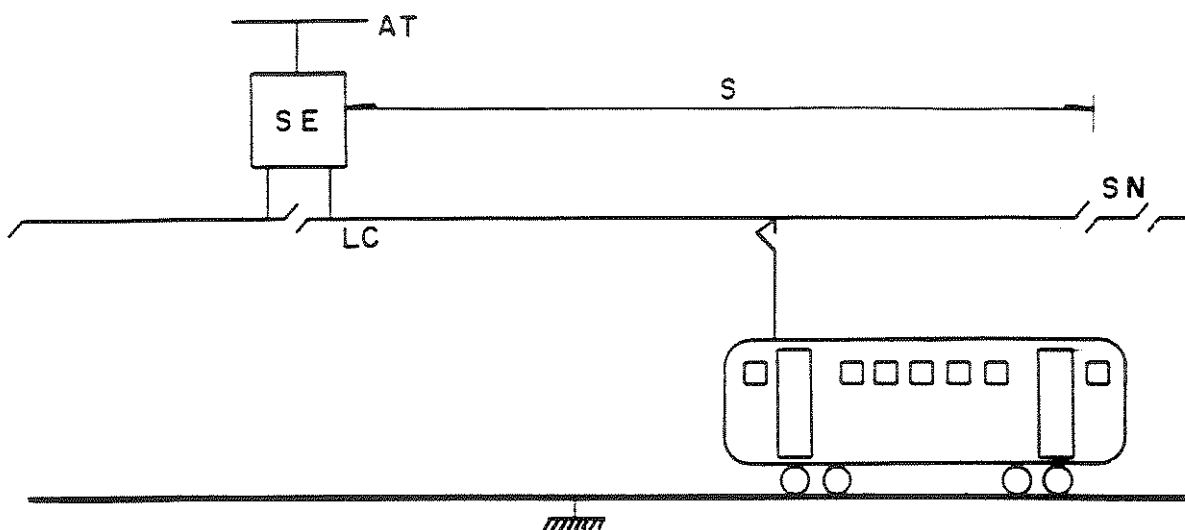


fig. 4.1 - representação de um trecho da linha

Inspecionando-se a figura 4.1, onde se tem uma representação de um trecho da linha, verifica-se que o mesmo compreende o transformador da subestação e o sistema aéreo de transmissão, composto principalmente pela linha de contato. A locomotiva, situada em uma posição qualquer da linha de contato, entre a subestação que alimenta o trecho e o terminal aberto deste, "enxerga" o sistema de alimentação de tração como sendo composto de duas admitâncias: uma à direita e outra à esquerda da posição em que se encontra.

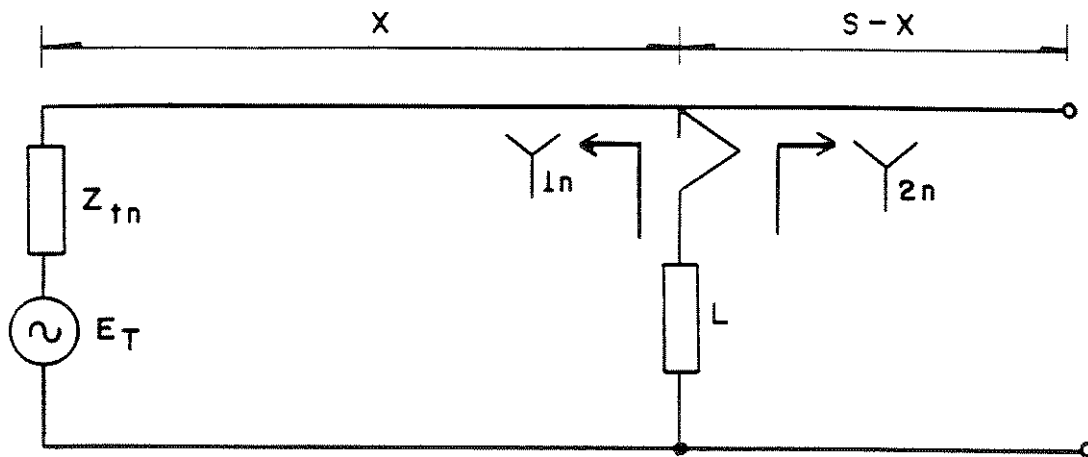


fig.4.2 - detalhe da posição da locomotiva no trecho de linha

As equações que expressam as admitâncias à esquerda ( $Y_1$ ), e à direita ( $Y_2$ ), são [6]:

$$Y_{1n} = \frac{\frac{1}{Z_{Tn}} \cosh \gamma_n x + \frac{1}{Z_{Cn}} \sinh \gamma_n x}{\cosh \gamma_n x + \frac{Z_{Cn}}{Z_{Tn}} \sinh \gamma_n x} \quad (4.1)$$

$$Y_{2n} = \frac{1}{Z_{Cn}} \tanh \gamma_n (s-x) \quad (4.2)$$

onde:

$\gamma_n$  é a constante de propagação da linha

$Z_{Cn}$  é impedância característica da linha

$x$  é a posição da locomotiva ao longo da linha



$(s-x)$  é a distância entre a locomotiva e o terminal aberto da linha

A  $n$ -ésima componente da tensão da linha de contato pode ser dada pela expressão:

$$V_n = \frac{I_n}{Y_n} \quad (4.3)$$

onde:

$Y_n$  é a admitância total vista pela locomotiva em  $x$

$I_n$  é a componente da corrente, na mesma ordem harmônica  $n$ .

Sabendo-se que a locomotiva varia sua posição no trecho de linha, convém considerar que os valores calculados para as admitâncias (equações 4.1 e 4.2) também variam em função desse posicionamento. Paralelamente, tem-se o gatilhamento dos tiristores sendo efetivado de uma forma gradual, o que torna a forma de onda da corrente absorvida pela locomotiva também dependente do instante deste gatilhamento. Para um dado posicionamento da locomotiva e também para um certo ângulo de gatilhamento dos tiristores, pode-se obter as componentes harmônicas de tensão, através da equação 4.3. Dessa forma, o aparecimento de sobretensões na linha de contato pode ser examinado. Considerando-se que o deslocamento da locomotiva no trecho de linha é muito mais lento do que o deslocamento do fenômeno de propagação ao longo da linha de contato, pode-se considerar que a locomotiva está parada, em uma dada posição do trecho, durante o processo de obtenção da forma de onda da tensão.

Estudos realizados por Graf [9] revelaram que, para um dado instante de gatilhamento dos tiristores, a posição ao longo da linha onde são observadas as sobretensões mais severas nem sempre é a posição onde se encontra a locomotiva causadora da sobretensão. Esta constatação tem importância quando se pensa também na proteção de uma outra locomotiva localizada no mesmo trecho de linha. De uma maneira geral, a situação em que a locomotiva se encontra operando próximo da terminação aberta da

linha, com ângulo de gatilhamento em torno de  $90^{\circ}$ , é considerada das mais preocupantes.

#### 4.3 - Ressonância no Sistema de Alimentação da Locomotiva

Observado sob um outro ponto de vista, o aparecimento de sobretensões na linha de contato está ligado ao fenômeno da ressonância. Para o sistema de alimentação de tração, pode-se avaliar a frequência de ressonância do mesmo desprezando-se as resistências envolvidas. O circuito ressonante é formado pela indutância de dispersão do transformador da subestação que alimenta o trecho mais a capacitância "shunt" da linha de contato. A equação 4.4 expressa a frequência de ressonância:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (4.4)$$

onde:

$\omega_r$  é a frequência angular de ressonância

L é a indutância de dispersão do transformador

C é a capacitância "shunt" total da linha de contato

Dessa forma, referindo-se novamente à equação 4.3, entende-se que, nas frequências próximas da frequência de ressonância do circuito descrito acima, a admitância total  $Y_n$ , que se encontra no denominador, assume valores mínimos enquanto que  $V_n$ , assume consequentemente valores máximos.

A frequência de ressonância, que pode vir a afetar o sistema de tração elétrica, está relacionada a alguns componentes existentes no sistema de tração. Dentre eles, já foram citadas a indutância de dispersão do transformador da subestação e a capacitância "shunt" da linha que compõe o sistema de alimentação para tração. Além desses, pode-se dizer que a resistência equivalente às perdas no transformador da subestação, tem ação sobre o amortecimento do sistema. O comprimento do trecho também exerce influência

cia sobre a frequência de ressonância. Longos trechos produzem frequências ressonantes mais baixas e portanto sobretensões maiores.

#### 4.4 - Uso de Filtros Para Aliviar a Magnitude das Sobretensões

O fato de que o sistema de alimentação de tração tem amortecimento fraco confere importância especial às sobretensões devidas a fenômenos de ressonância. A magnitude deste tipo de sobretensão pode ser atenuada através da instalação de filtros supressores que introduzem a alteração necessária no nível de amortecimento do sistema

As magnitudes dos picos de sobretensões observados na tensão  $V_n$  podem, portanto, ser reduzidas variando-se os valores de  $Y_n$ , nas frequências próximas da frequência de ressonância, através da utilização de filtros. A experiência já demonstrou que os filtros supressores não devem ser instalados a bordo da locomotiva. A instalação dos mesmos na linha permite utilizar um mesmo filtro para todas as locomotivas que percorrem o trecho. Não haveria também, neste caso, o inconveniente de a locomotiva ter que transportar o filtro. Infelizmente a ação do filtro seria pouco significativa, caso o mesmo estivesse instalado na própria subestação, o que aliás seria uma situação muito conveniente. A alternativa que produz mais resultados é instalar o filtro na terminação aberta da linha [9]. A instalação de filtros (do tipo "shunt") é portanto mais recomendada para o terminal aberto da linha, variando-se assim os valores de  $Y_{2n}$ , pois é inviável alterar  $Y_{1n}$  devido à impedância do transformador da subestação possuir valores baixos [6].

De uma maneira geral, a seleção de um filtro eficiente deve pressupor que o mesmo seja capaz de representar para a linha uma terminação igual à impedância de surto da mesma, para a frequência de ressonância, e uma impedância bastante maior que esta, para a frequência fundamental. A dificuldade na obtenção dos parâmetros reside no fato de que a própria frequência de ressonância varia com a instalação do filtro como se vê pela equação 4.3

sintonizado, etc.) deve-se verificar qual é a magnitude da frequência de ressonância, uma decorrência do comprimento do trecho, conforme já mencionado acima, e da capacitância "shunt". Não é preocupação principal deste trabalho examinar em detalhe o projeto de filtros.

#### **4.5 - Descrição do Procedimento Para a Obtenção da Forma de Onda da Tensão**

##### **4.5.1 - Introdução**

A obtenção da forma de onda da tensão da linha de contato obedece os passos apresentados na figura 4.3. Observando-se essa figura, percebe-se que existem dois caminhos distintos que se juntam no passo referente ao cálculo da tensão da linha de contato no domínio da frequência. Isso deve-se ao fato desse estudo, como já mencionado anteriormente, não considerar a interação entre o sistema de alimentação para tração e a locomotiva.

##### **4.5.2 - Detalhamento dos Passos Listados no Procedimento**

a) Escolha dos parâmetros da locomotiva:

De acordo com o estudado no capítulo II, mais especificamente no que diz respeito ao circuito equivalente para a locomotiva, os parâmetros necessários para se obter uma boa representação da locomotiva, em termos de simulação computacional, são:

- a resistência equivalente às perdas e a indutância de dispersão do transformador que vai a bordo da locomotiva;
- o número de pontes retificadoras a serem utilizadas no conversor (uma ou duas);
- o(s) ângulo(s) de gatilhamento dos tiristores da(s) ponte(s);
- a corrente contínua requerida pelo circuito de armadura do motor;
- a resistência e a indutância equivalentes do circuito de armadura do motor;
- a força contraeletromotriz necessária para manter a corrente do

circuito de armadura do motor, constante.

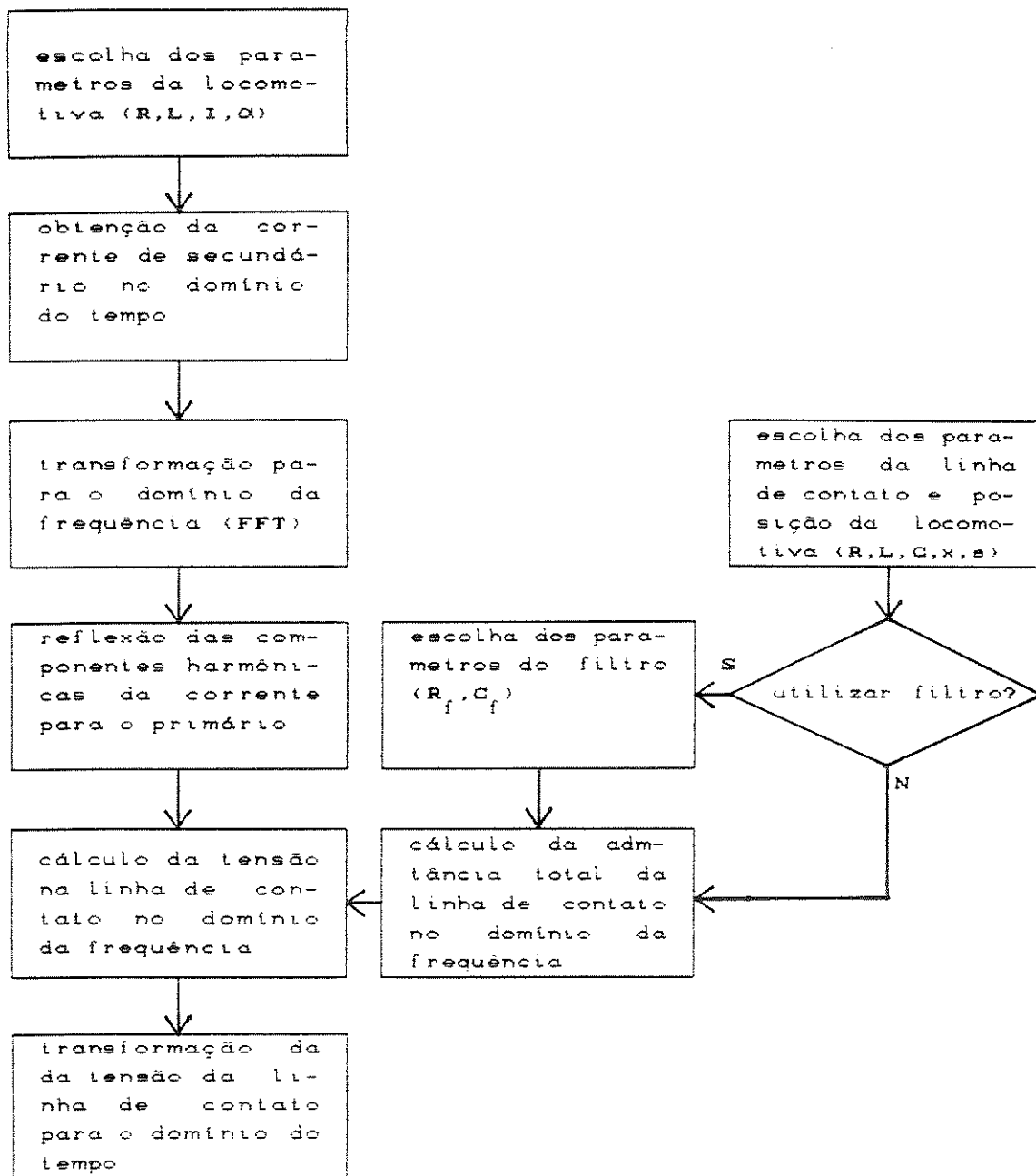


fig. 4.3 - procedimento para a obtenção da tensão na LC

b) Obtenção da corrente de secundário do transformador da locomotiva no domínio do tempo:

Neste trabalho utilizar-se-á o programa computacional SACEC para a obtenção da corrente de secundário do transformador da locomotiva, de acordo com o que foi visto no capítulo III, utilizando os parâmetros descritos no passo anterior.

c) transformação para o domínio da frequência:

Este passo será feito utilizando-se um outro programa computacional integrante do pacote do SACEC, chamado programa de análise harmônica - PAH. O PAH em sua análise harmônica, leva em consideração um período da curva a ser analisada e supõe que o período se reproduz de modo idêntico no tempo. O PAH fornece como resultados:

- os termos em seno e cosseno da série de Fourier;
- os termos complexos que representam as amplitudes das harmônicas;
- a taxa total de harmônicas em relação à amplitude da primeira harmônica;
- a plotagem gráfica do espectro de Fourier analisado.

A ordem máxima das harmônicas depende do número de divisões usado para o cálculo da transformada rápida de Fourier. Além disso, a precisão do cálculo está ligada com o número de pontos das curvas dos resultados obtidos com a simulação do SACEC. Ou seja, o aumento do número de divisões permite aumentar a ordem das harmônicas calculadas e melhora a sua precisão

d) Reflexão das componentes harmônicas da corrente para o primário do transformador da locomotiva:

Embora seja possível a simulação de transformadores pelo SACEC, a obtenção da corrente do primário do transformador da locomotiva diretamente com a utilização desse programa, é uma tarefa bastante difícil. Isto se deve ao fato de o modelo que deve

ser implementado no SACEC não poder ter acoplamento unitário. Dessa forma é uma operação muito difícil efetuar o gatilhamento dos tiristores, que estão no secundário, em função da tensão aplicada ao primário. Assim, optou-se por simular a operação da locomotiva, sem transformador, ligando na entrada do conversor uma fonte de tensão cuja magnitude é idêntica à que seria fornecida pelo secundário do transformador. Após obter essa forma de onda no domínio do tempo, passa-se para o domínio da frequência e obtém-se uma representação da corrente em frequência para o primário utilizando-se as equações para transformador ideal:

$$E_1 = N \cdot E_2 \quad (4.5)$$

$$I_1 = \frac{1}{N} I_2 \quad (4.6)$$

Encontrando o valor de N na equação 4.5 e substituindo na equação 4.6, tem-se uma expressão para a corrente do primário em função da corrente do secundário e da relação de tensões entre secundário e primário:

$$I_1 = \frac{E_2}{E_1} I_2 \quad (4.7)$$

e) Escolha dos parâmetros da linha de contato e da posição da locomotiva:

A representação exata do sistema de alimentação da tração é difícil em se tratando de frequências harmônicas. Felizmente, o único elemento não linear no caminho da corrente são os trilhos porém, esses estão em paralelo com a terra e com o condutor de retorno. Portanto, é proposto representar o sistema de alimentação da tração por um modelo linear cujos parâmetros são a resistência, a indutância e a capacitância "shunt" uniformemente distribuídas.

A posição a ser escolhida para a locomotiva ao longo da linha de contato será também a posição na qual serão calculadas as componentes harmônicas da tensão.

f) Escolha dos parâmetros do filtro:

Essa opção do procedimento deve ser usada depois de se constatar que a configuração escolhida para o sistema de tração está susceptível à ocorrência de sobretensões sob determinada condição de operação. Como já mencionado, o filtro deve ser instalado no terminal aberto da seção da linha e, dessa forma, provocará uma mudança no valor da admitância à direita da posição em que a locomotiva se encontra conectada. A equação 4.8 exprime o novo valor da admitância que a locomotiva "enxerga" desde a sua posição até o terminal da linha, que agora possui um filtro instalado:

$$Y_{2n} = \frac{\frac{1}{Z_{Fn}} \cosh \gamma_n (s-x) + \frac{1}{Z_{cn}} \sinh \gamma_n (s-x)}{\cosh \gamma_n (s-x) + \frac{Z_{cn}}{Z_{Fn}} \sinh \gamma_n (s-x)} \quad (4.8)$$

onde:

$Z_{Fn}$  é a impedância do filtro na harmônica n

Na figura 4.4 são mostrados diferentes tipos de arranjos de filtros que podem ser utilizados nessa situação. Teoricamente, todos esses arranjos funcionam para contornar o problema de sobretensões porém, na prática, utilizar na terminação da linha uma impedância de surto, figura 4.4a, que é puramente resistiva, não é aconselhável, pois as perdas em potência, na frequência fundamental são excessivas. Essas perdas podem ser reduzidas a níveis um pouco melhores se for escolhido um arranjo de filtro mais apropriado. Ou seja, se a terminação com impedância de surto for trocada por um filtro de primeira ordem, figura 4.4b, as perdas de potência na frequência fundamental serão reduzidas porém, nem sempre assumirão valores aceitáveis.

Se um reator é inserido em paralelo com o resistor, figura 4.4c, consegue-se uma excelente redução nas perdas em potência. Assim, o tipo de arranjo do filtro a ser usado é altamente dependente da frequência de ressonância do sistema de tração.



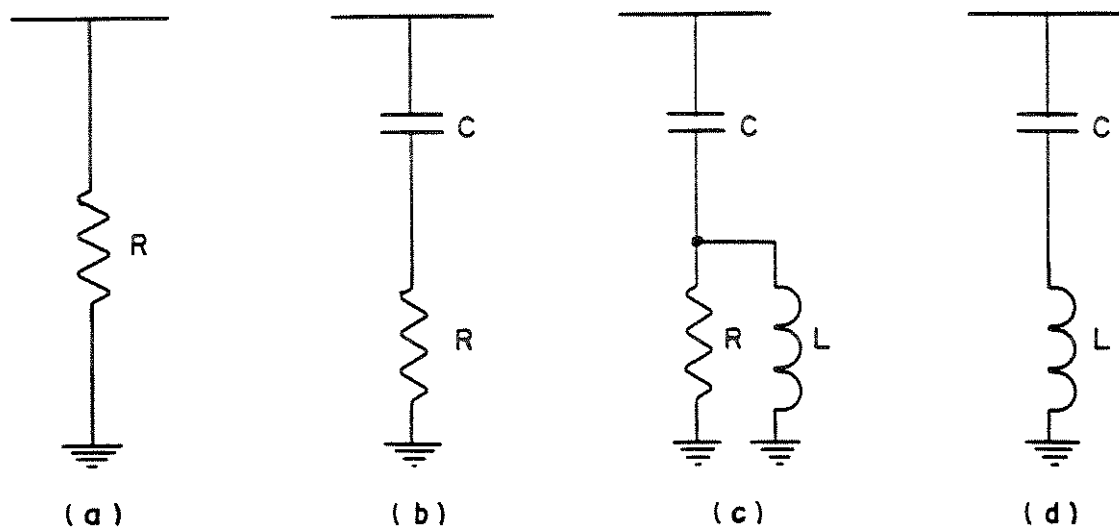


fig 4.4 - tipos de arranjos de filtros

Para frequências ressonantes acima de 1 kHz é mais usual um filtro de segunda ordem enquanto que abaixo desse valor é necessário incluir um ou mais ramos de filtros sintonizados, figura 4.4d, a fim de reduzir-se as sobretensões nas frequências harmônicas mais baixas.

g) Cálculo da admitância total no domínio da frequência:

Esse passo do procedimento foi feito num programa computacional implementado em linguagem Pascal chamado TC.PAS. A rotina pertencente à este programa que é responsável pelo cálculo da admitância total utiliza as expressões já estudadas e dadas pelas equações 4.1, 4.2 e 4.8. Ou seja, caso seja feita a opção por calcular a tensão presente na linha de contato sem o uso de filtro a admitância total é dada pela soma das equações 4.1 e 4.2. Se, por outro lado, for feita a opção pela utilização de um filtro a admitância total passa a ser dada pela soma das equações 4.1 e 4.8.

É importante ressaltar que as equações citadas são obtidas através da solução de equações diferenciais para linhas de transmissão longas. Essa solução considera, em sua formulação, o fato de os parâmetros característicos da linha não serem tratados

como concentrados e sim parâmetros distribuídos uniformemente ao longo de seu comprimento. Não é considerado a variação desses parâmetros em função da frequência.

h) Cálculo da tensão da linha de contato no domínio da frequência:

Durante a sua execução, o programa TC.PAS, após calcular as componentes harmônicas da admitância total da linha de contato, lê as componentes harmônicas da corrente, de um arquivo previamente determinado, utiliza-se da equação 4.3 para calcular as componentes harmônicas da tensão da linha de contato. Como o resultado que interessa é o conteúdo harmônico responsável pela distorção na forma de onda da tensão, não é feito o cálculo para a componente fundamental dessa tensão, pois, trata-se de um valor já conhecido.

i) Transformação da tensão para o domínio do tempo:

Após ter-se calculado as componentes harmônicas da tensão presente na linha de contato, na posição ocupada pela locomotiva no trecho, torna-se necessário a transformação dessa tensão para o domínio do tempo, para que os picos da mesma, sejam melhor avaliados. A rotina que efetua a transformada inversa de Fourier, pertencente ao programa TC.PAS, baseia-se na equação 4.9 que por sua vez está baseada em uma outra originalmente escrita por N. Brenner.

$$h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n \cdot e^{-2\pi i k n / N} \quad (4.9)$$

onde:

$h_k$  é o conjunto de pontos que representam a tensão no tempo

$H_n$  representa o conjunto de pontos complexos da tensão

$N$  é o número de elementos de  $h_k$  e  $H_n$

As variáveis de entrada dessa rotina são: o número

de dados do conjunto de dados complexos (NN), o conjunto de dados complexos (DATAR e DATAI) e ISIGN que deve ser -1 ( para calcular a transformada inversa).

Para obter a forma de onda completa da tensão, ou seja, para que a forma de onda da tensão calculada possa ser "plotada", devem ser somados os pontos da componente harmônica fundamental ao conjunto de pontos extraídos da rotina da transformada inversa de Fourier, não calculada no passo anterior. Dessa forma, a componente fundamental da tensão calculada para a linha de contato está em fase com a tensão de entrada atribuída para o conversor da locomotiva.

Finalizando esse passo, utiliza-se uma rotina gráfica cujas finalidades são as de imprimir a forma de onda calculada e detectar os valores máximos desta, sendo então possível, proceder alguma análise com respeito à sobretensão.

#### 4.6 - Obtenção da Tensão em Posição Diferente da Locomotiva

Com a presente metodologia é possível também obter a forma de onda da tensão presente na linha de contato em posição diferente daquela em que se encontra a locomotiva, caso haja interesse em se estudar sobretensões causadas por uma locomotiva sobre uma outra localizada no mesmo trecho.

As equações, na forma hiperbólica, que definem a tensão e a corrente em qualquer posição ao longo da linha são [10].

$$V(x) = A \cosh \gamma x + B \sinh \gamma x \quad (4.10)$$

$$I(x) = C \cosh \gamma x + D \sinh \gamma x \quad (4.11)$$

onde,

$\gamma$  é a constante de propagação da linha

As constantes A, B, C e D que são advindas da integração efetuada para a obtenção das equações citadas

anteriormente, devem ser determinadas através de uma escolha conveniente das condições de contorno da linha. No caso em questão, para a determinação de tais constantes deve-se considerar como condições "iniciais" independentes a tensão e a corrente na posição em que se encontra a locomotiva (uma posição genérica  $\rho$  como ilustra a figura 4.5).

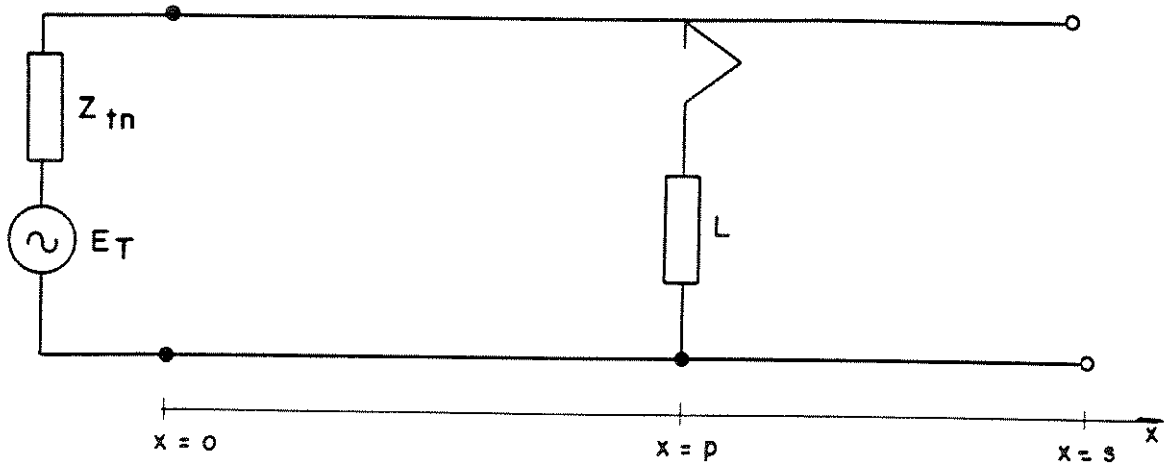


fig 4.5 - locomotiva posicionada em  $\rho$

Substituindo as condições de contorno nas equações 4.10 e 4.11, obtém-se

$$V(\rho) = A \cosh \gamma \rho + B \sinh \gamma \rho \quad (4.12)$$

$$I(\rho) = C \cosh \gamma \rho + D \sinh \gamma \rho \quad (4.13)$$

A partir destas equações pode-se obter expressões para as constantes  $A$  e  $C$ , por exemplo:

$$A = \frac{V(\rho) - B \sinh \gamma \rho}{\cosh \gamma \rho} \quad (4.14)$$

$$C = \frac{I(\rho) - D \sinh \gamma \rho}{\cosh \gamma \rho} \quad (4.15)$$

Prosseguindo-se com os cálculos, a determinação das constantes B e D é feita substituindo-se as equações 4.10 e 4.11 nas equações diferenciais que as originaram, para as condições de contorno de interesse:

$$B = - \frac{\left[ Z_c \cosh \gamma \rho I(\rho) + V(\rho) \sinh \gamma \rho \right]}{\cosh^2 \gamma \rho - \sinh^2 \gamma \rho} \quad (4.16)$$

$$D = - \frac{\left[ \frac{\cosh \gamma \rho V(\rho)}{Z_c} + I(\rho) \sinh \gamma \rho \right]}{\cosh^2 \gamma \rho - \sinh^2 \gamma \rho} \quad (4.17)$$

onde

$Z_c$  é a impedância característica da linha

Assim, de posse das constantes A e B em função da tensão e da corrente a que está submetida a locomotiva, volta-se à equação 4.10 para calcular a tensão em um ponto genérico x ao longo da linha alcançando-se portanto o objetivo desejado.

#### 4.7 - Considerações Finais

Neste capítulo, detalhou-se, como objetivo principal, o procedimento utilizado para a obtenção da forma de onda da tensão da linha de contato, a partir da corrente absorvida pela locomotiva. Detalhou-se, inicialmente, o princípio básico para a obtenção da tensão da linha de contato. A equação (4.3) permite ao observador, analisar os elementos fundamentais, presentes no estudo, levando-se em conta as considerações e hipóteses aventadas.

Abordou-se, também, a possível ocorrência de sobretensões, na presença de ressonâncias no sistema de alimentação para a tração. Ressonâncias estas que, por sua vez, são influenciadas por diversos parâmetros do sistema de tração. Estudou-se, ainda, alguns arranjos de filtros, que podem ser utilizados para

neutralizar ou aliviar os efeitos das sobretensões sobre o sistema de tração.

Encerrando o capítulo, descreveu-se uma metodologia para obter a tensão em qualquer ponto da linha de contato, tendo-se como referência a posição ocupada pela locomotiva no trecho.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS OBTIDOS

#### 5.1 - Introdução

Os resultados que serão apresentados a seguir representam a aplicação da metodologia desenvolvida nos capítulos anteriores a casos de interesse especial, dentro dos objetivos propostos desde o início deste trabalho.

Na análise, além dos parâmetros do sistema (locomotiva e rede de alimentação) também o ângulo  $\alpha$  de gatilhamento dos tiristores e a posição  $x$  da locomotiva no trecho são variáveis interessantes para a análise. A simulação do funcionamento da locomotiva, ou seja, a obtenção da forma de onda distorcida da corrente absorvida por uma locomotiva, através de um método de simulação escolhido, é apresentada no apêndice B.

Dessa forma, os resultados dos casos selecionados para a aplicação do procedimento, visam mostrar que, de acordo com as afirmações contidas nos capítulos anteriores, a forma de onda distorcida da tensão da linha de contato pode ficar sujeita à ocorrência de sobretensão devido à contribuição dos parâmetros do sistema de tração citados anteriormente.

## 5.2 - Resultados de Casos Seleccionados

### Caso 1a: Obtenção da forma de onda da tensão da linha de alimentação, na posição da locomotiva, em função de $\alpha$

Neste caso, faz-se variar o ângulo  $\alpha$  de gatilhamento da ponte retificadora para investigar a influência deste parâmetro sobre a forma de onda da tensão da linha de contato. Para o exame deste caso, o seguinte conjunto de dados foi considerado na simulação:

#### Dados da Linha de Alimentação [6]:

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| resistência série    | 0,123 $\Omega$ /km |
| indutância série     | 1,088 mH/km        |
| capacitância "shunt" | 0,030 $\mu$ F/km   |
| frequência           | 50,00 Hz           |
| comprimento          | 20,50 km           |

#### Dados da Locomotiva [7]

|  |                  |
|--|------------------|
| resistência de perdas do transformador   | 2,240 m $\Omega$ |
| indutância de dispersão do transformador | 0,178 mH         |
| indutância do circuito do motor          | 5,000 mH         |
| constante de tempo do circuito do motor  | 50 ms            |
| corrente do motor                        | 1000 A           |
| tensão do motor                          | 1000 V           |
| posição ocupada no trecho                | 20.5 km          |
| tipo do conversor                        | um estágio       |

#### Dados do Transformador da Subestação [6]

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| tensão de secundário    | 25 kV         |
| resistência de perdas   | 8.13 $\Omega$ |
| indutância de dispersão | 24.07 mH      |



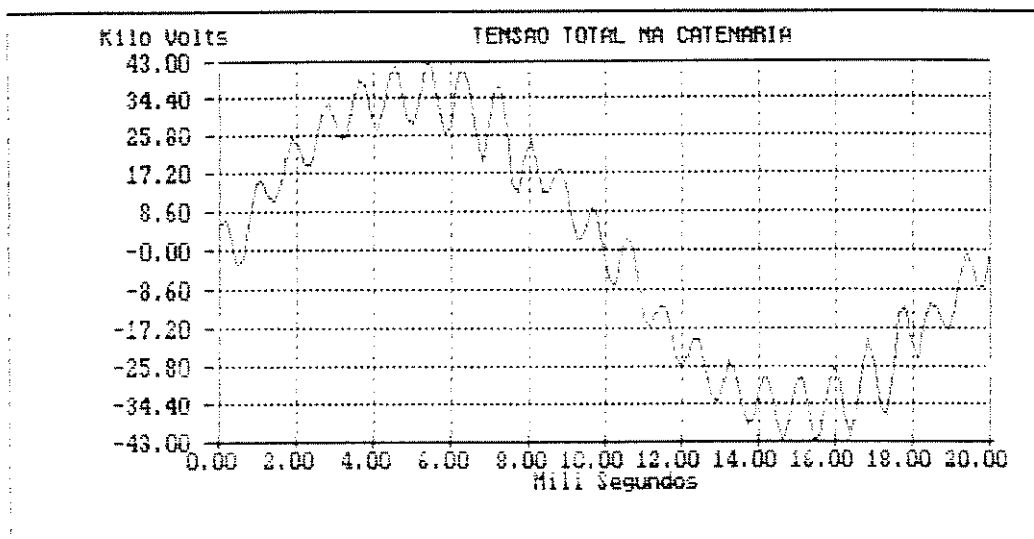


fig 5.1 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 140^\circ$

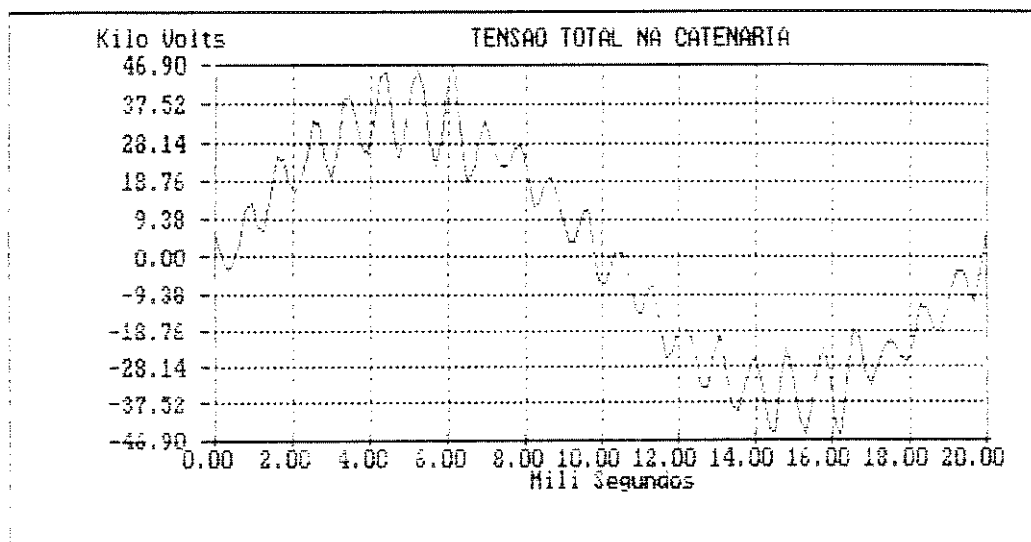


fig 5.2 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 120^\circ$

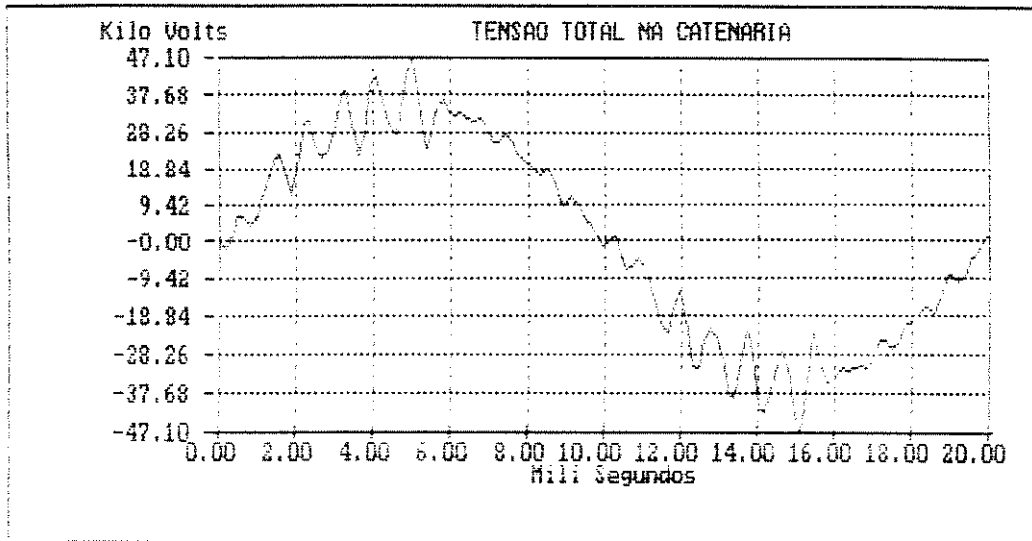


fig. 5.3 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 100^\circ$

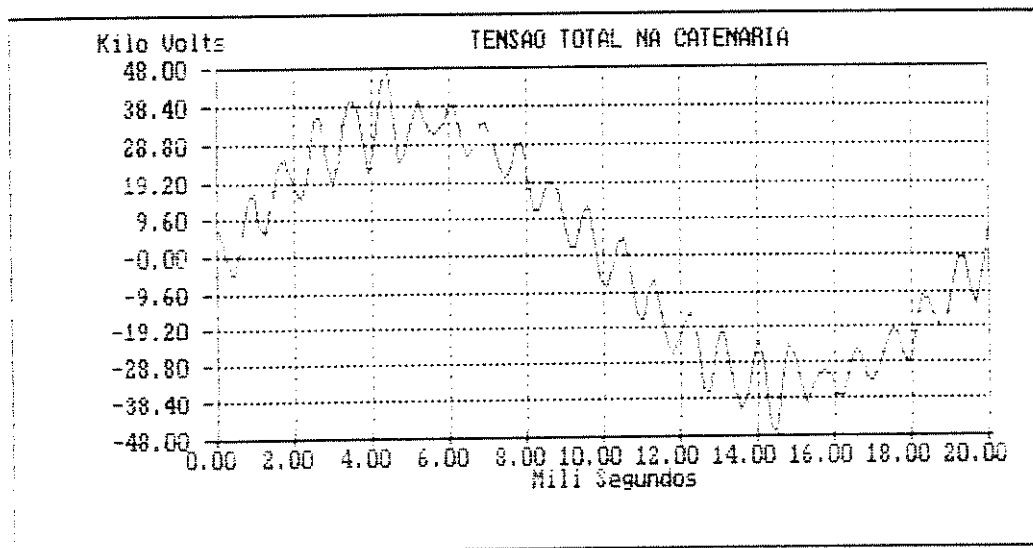


fig. 5.4 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 90^\circ$

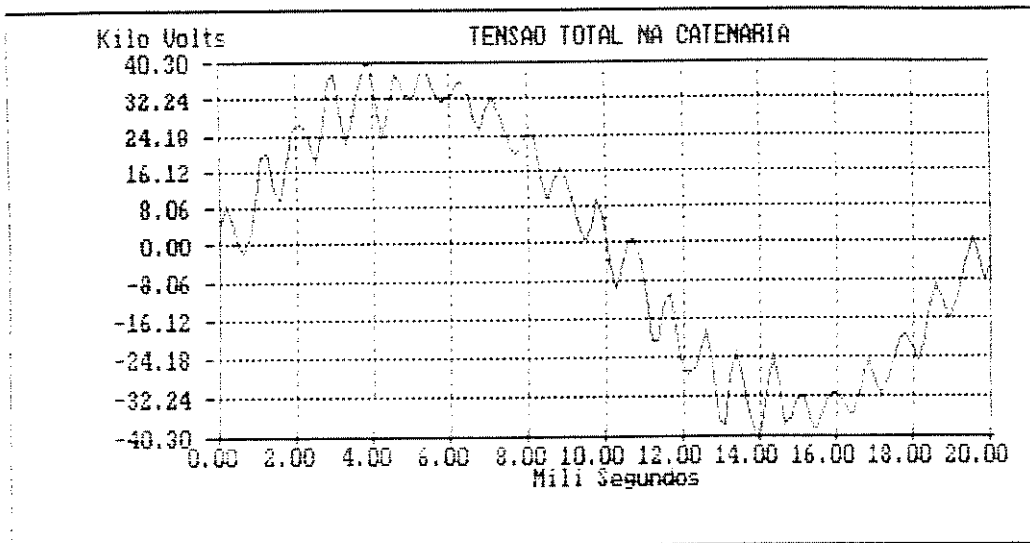


fig. 5.5 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 80^\circ$

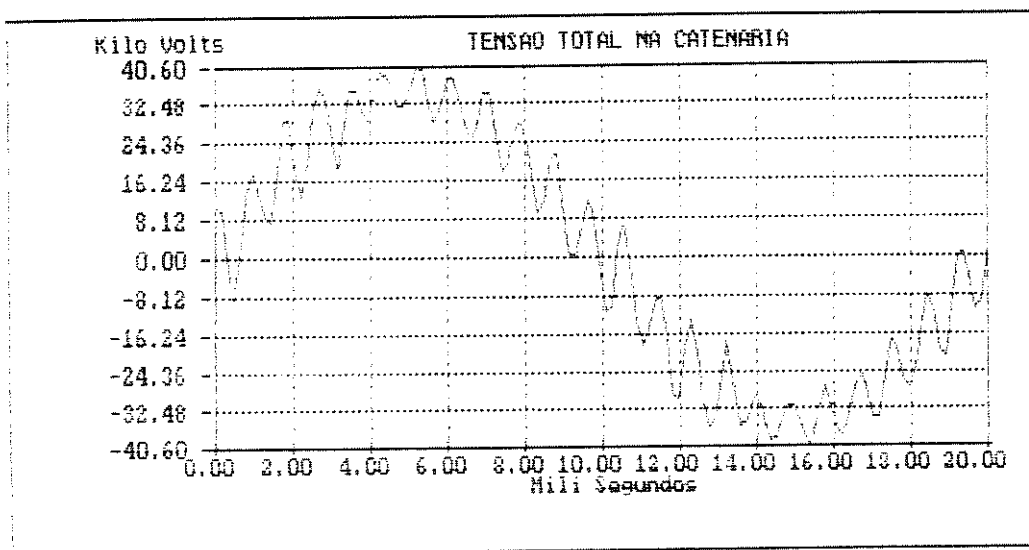


fig. 5.6 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 60^\circ$

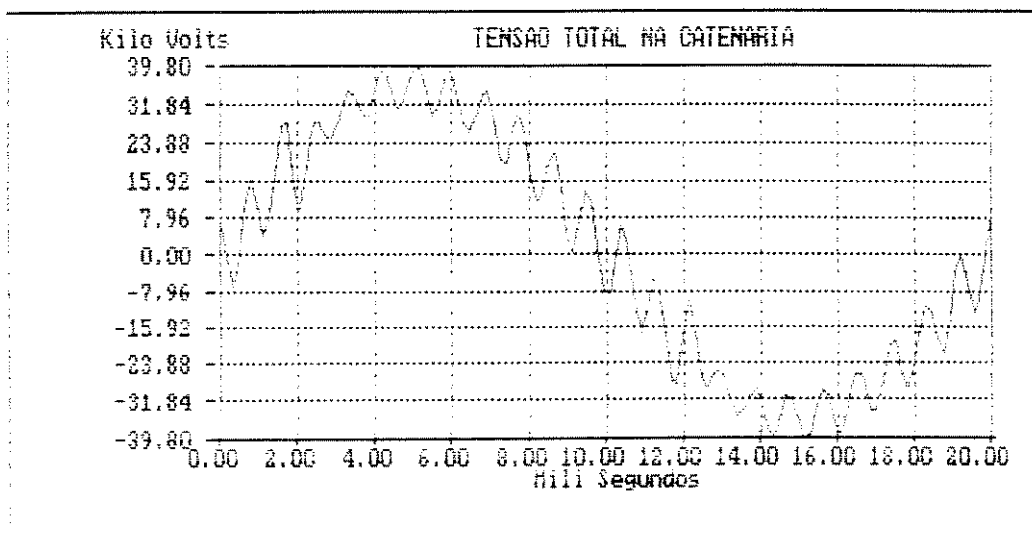


fig. 5.7 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 40^\circ$

Ao usar o procedimento para a obtenção da forma de onda da tensão da linha de contato, para o caso 1a, pretendeu-se mostrar o caso mais crítico de operação da locomotiva. As observações que merecem destaque nesse caso, são:

i) o pico da forma de onda da tensão no pantógrafo, para uma locomotiva que abriga um conversor c.a./c.c. de um estágio, é maior do que no pantógrafo de uma locomotiva abrigando um conversor de dois estágios, e;

ii) pôde ser observada a configuração mais crítica - locomotiva posicionada no fim do trecho e gatilhamento dos tiristores em  $90^\circ$  - figura 5.4. As formas de onda para essa mesma locomotiva e com esse mesmo ângulo de gatilhamento, porém, posicionada no início e no meio do trecho, podem ser observadas, respectivamente, nas figuras 5.15 e 5.16.

Caso 1b: Semelhante ao caso 1a com a utilização de conversor de dois estágios.

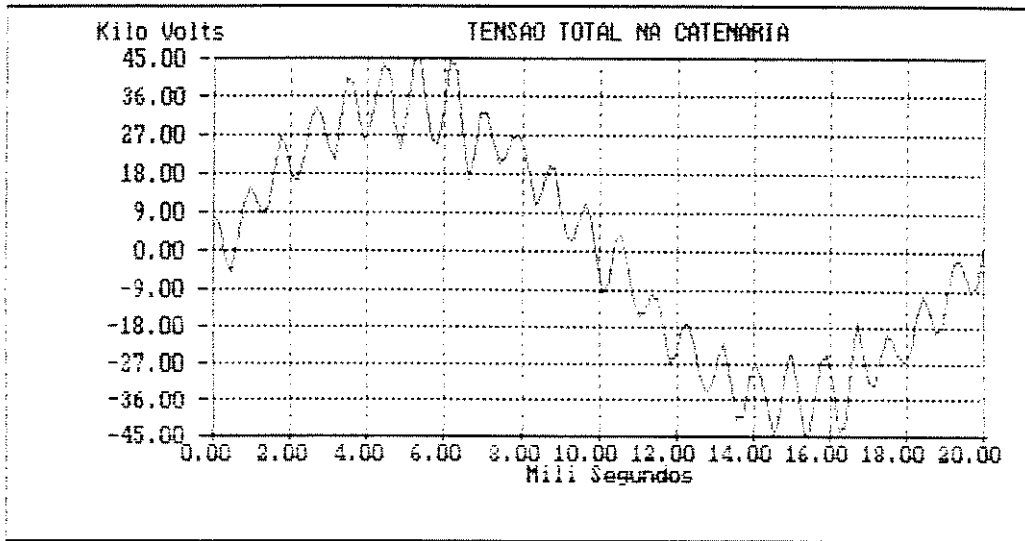


fig. 5.8 ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 122,15^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

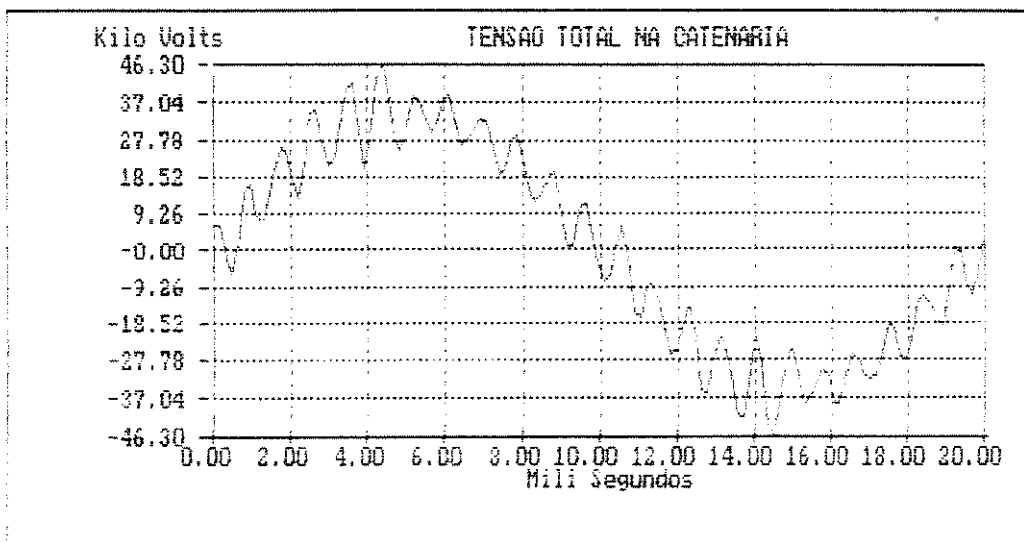


fig 5.9 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 90^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

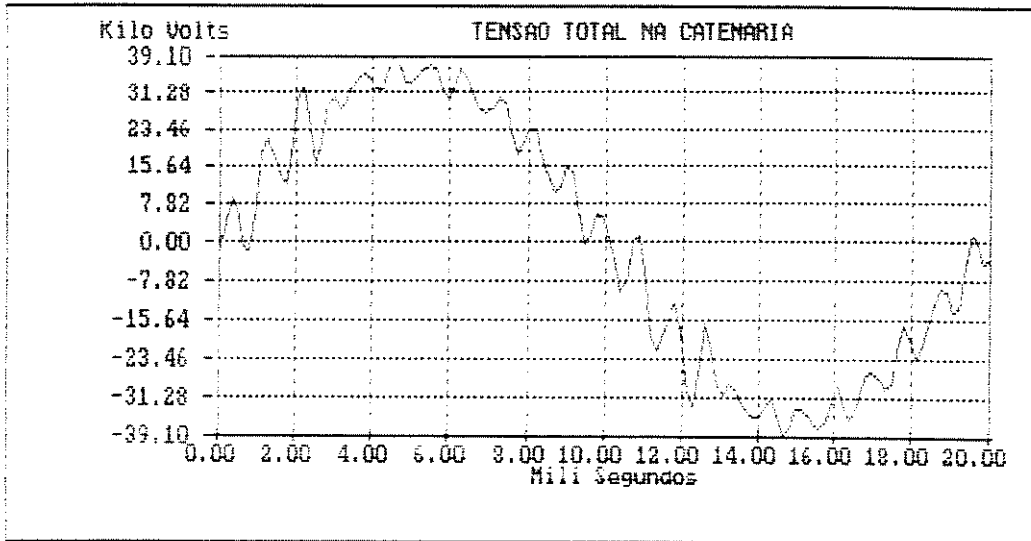


fig. 5.10 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 49.25^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

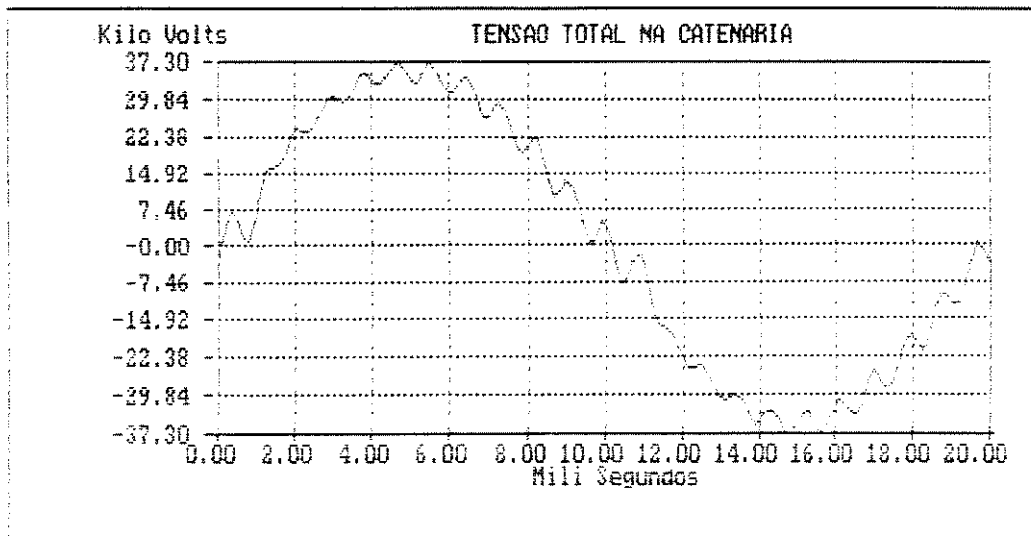


fig. 5.11 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

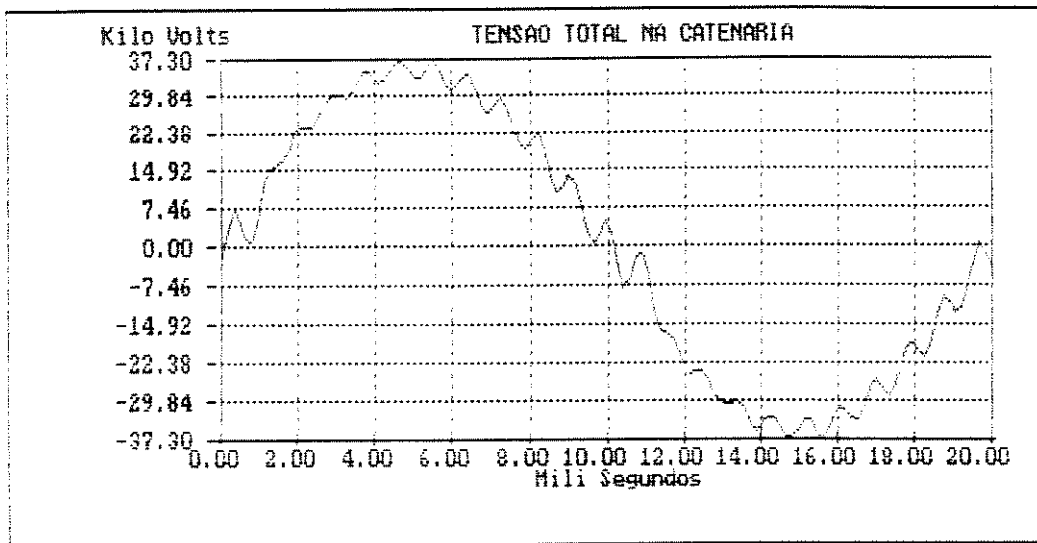


fig. 5.12 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 130,75^\circ$

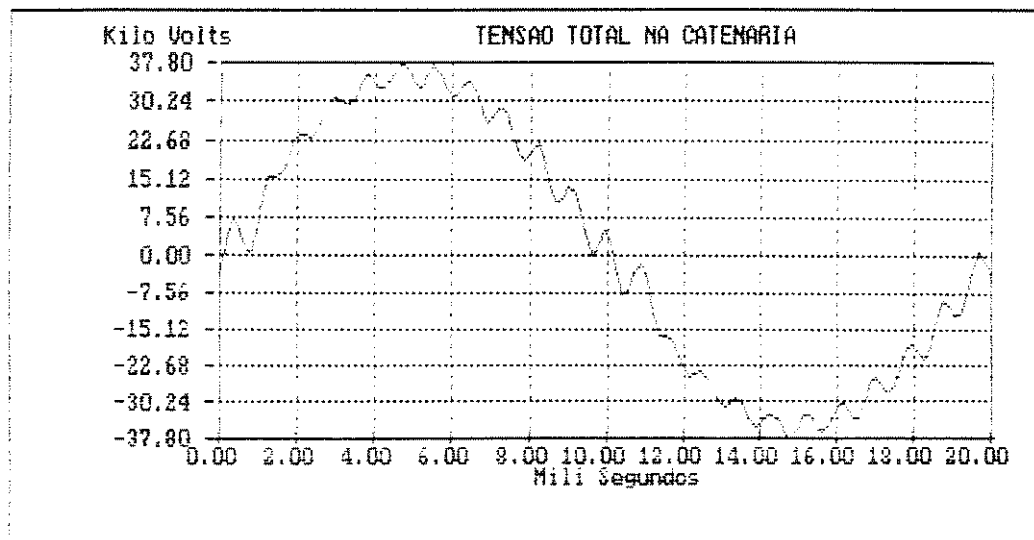


fig. 5.13 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 90^\circ$

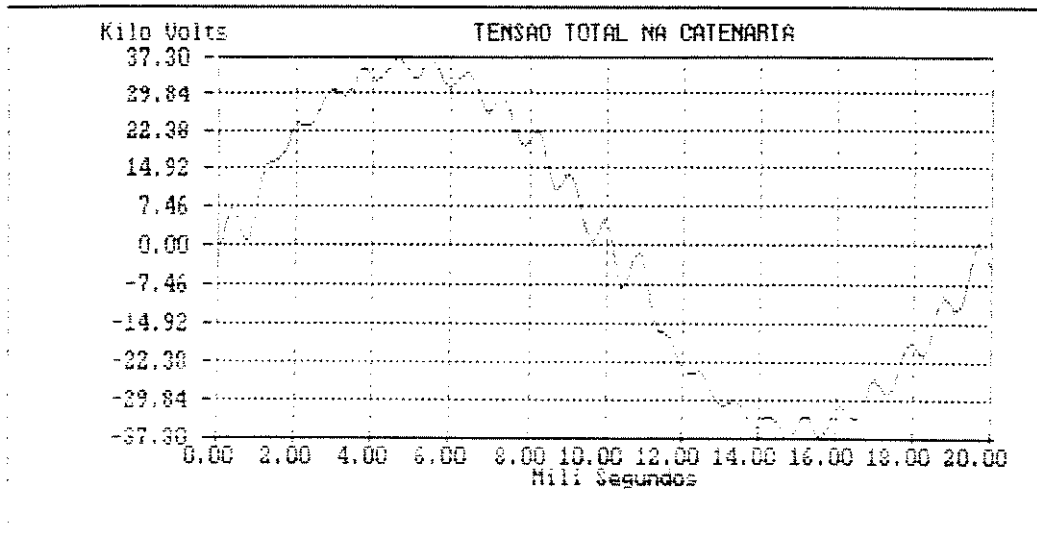


fig. 5.14 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 57,85^\circ$

Para ilustrar o caso **1b**, utilizou-se um conversor de dois estágios, cujos gatilhamentos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  tornam o funcionamento deste semelhante ao conversor do caso **1a**, sob o ponto de vista da tensão que alimenta o motor de tração. Essa semelhança está detalhada no apêndice A.

As figuras apresentadas para os casos 1a e 1b permitem certificar-se de que o programa funciona a contento, inclusive porque as situações mais críticas quanto a sobretensões puderam ser reproduzidas, como era a expectativa.



Caso 2a: Obtenção da forma de onda da tensão da linha de alimentação em função da posição da locomotiva, mantendo  $\alpha = 90^\circ$ .

Nesta parte do trabalho, o ângulo mais crítico para o gatilhamento é fixado enquanto a posição da locomotiva é variada no trecho. A influência sobre a tensão da linha de contato é observada.

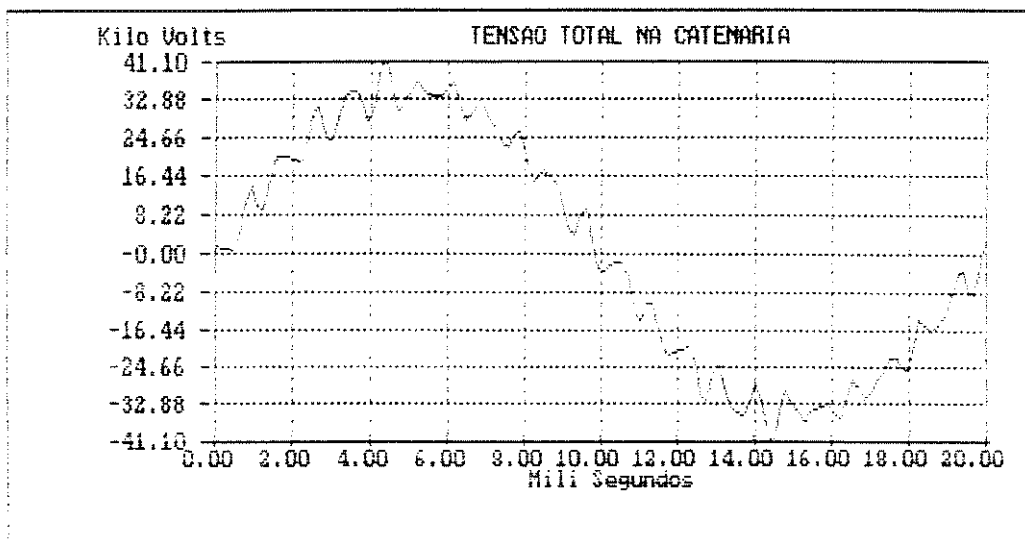


fig 5.15 - locomotiva posicionado no início do trecho

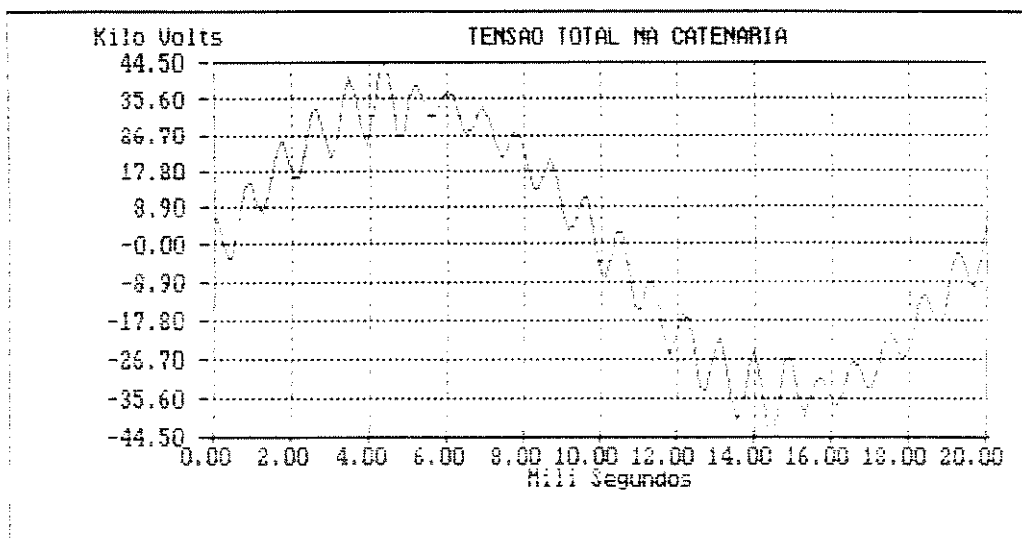


fig. 5.16 - locomotiva posicionada no meio do trecho

Caso 2b: Semelhante ao Caso 2a usando conversor de dois estágios.

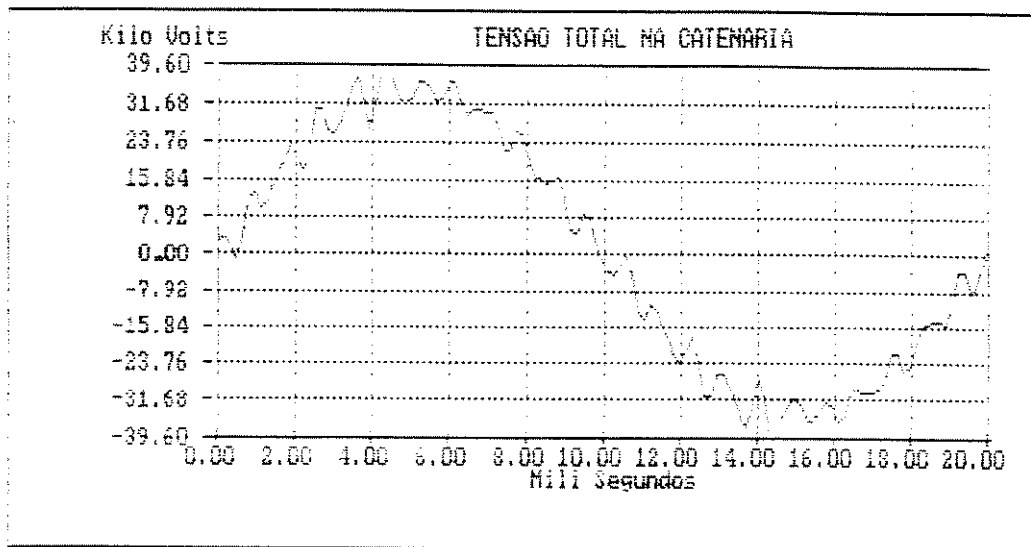


fig. 5.17 - locomotiva posicionado no início do trecho

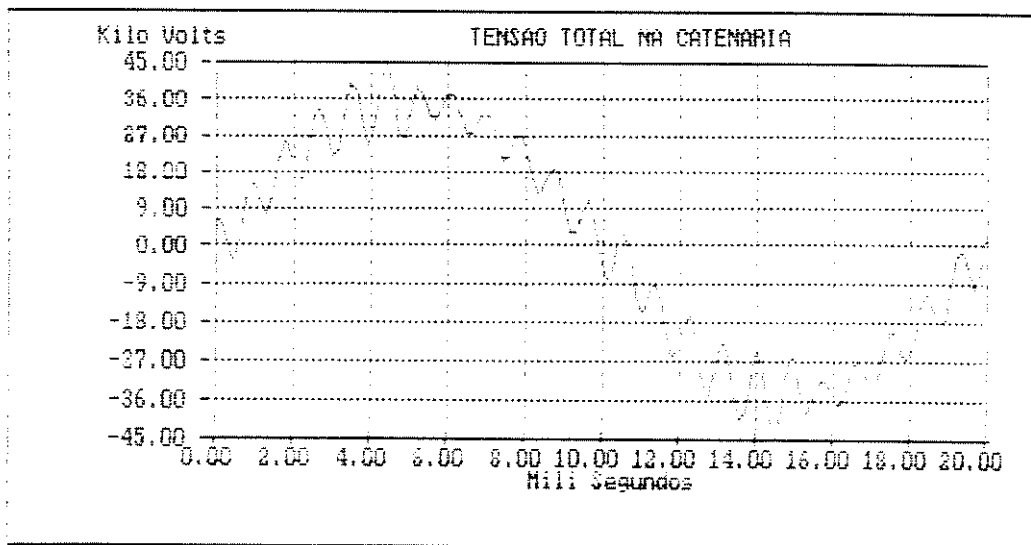


fig. 5.18 - locomotiva posicionado no meio do trecho

A eficácia do programa, quanto a indicar a posição mais crítica no trecho, pode ser verificada quando se examina estes dois últimos casos descritos em combinação com as figuras 5.4 e 5.9, de casos anteriores.

Em seguida, os casos 1a e 1b são refeitos, com a instalação de filtro para reduzir o nível de sobretensão.

Caso 3a: Caso 1a utilizando filtro.

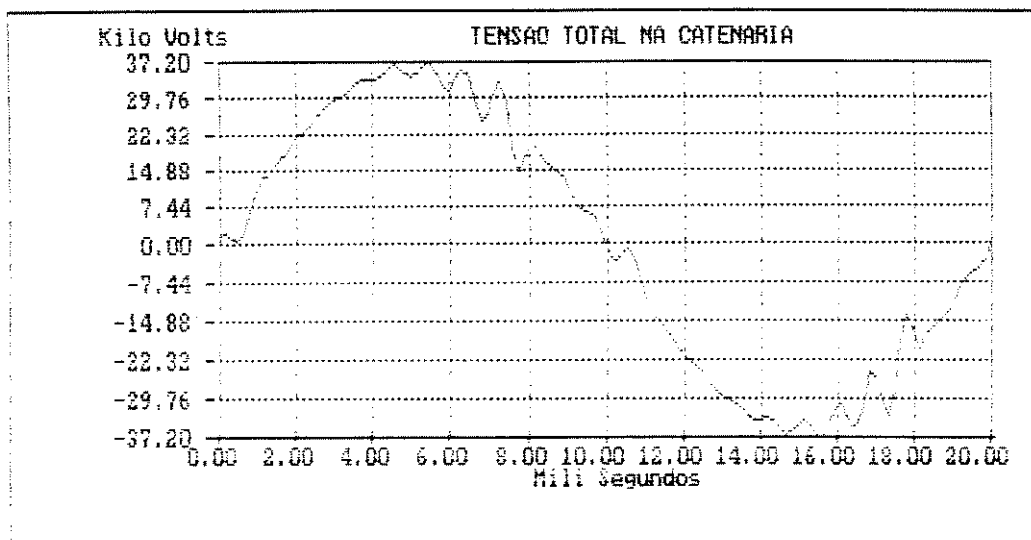


fig. 5.19 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 140^\circ$

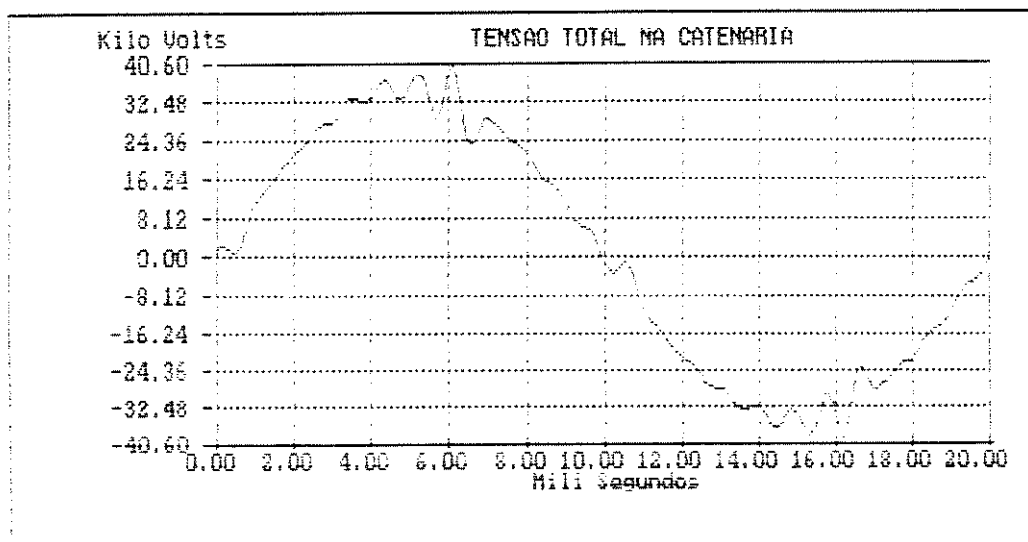


fig. 5.20 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 120^\circ$

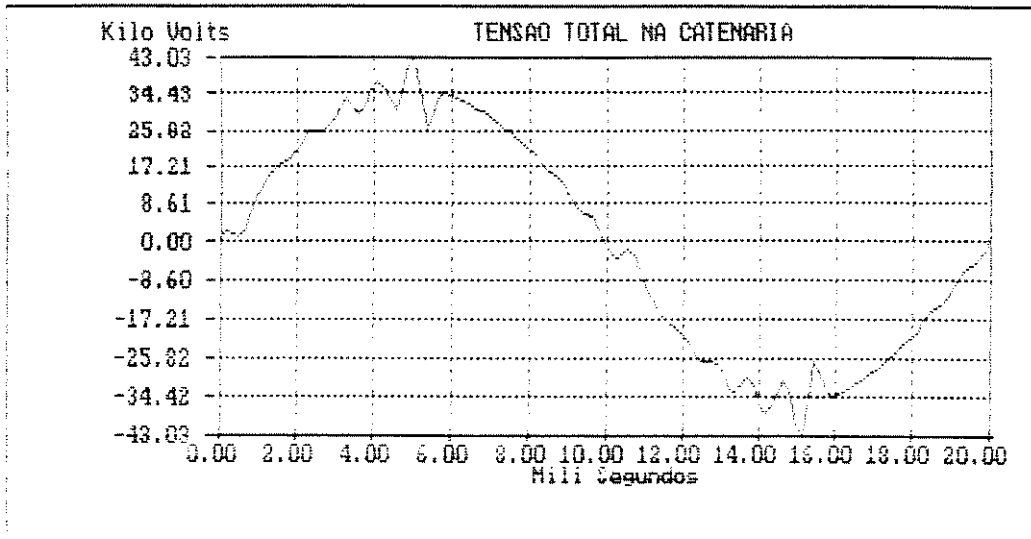


fig. 5.21 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 100^\circ$

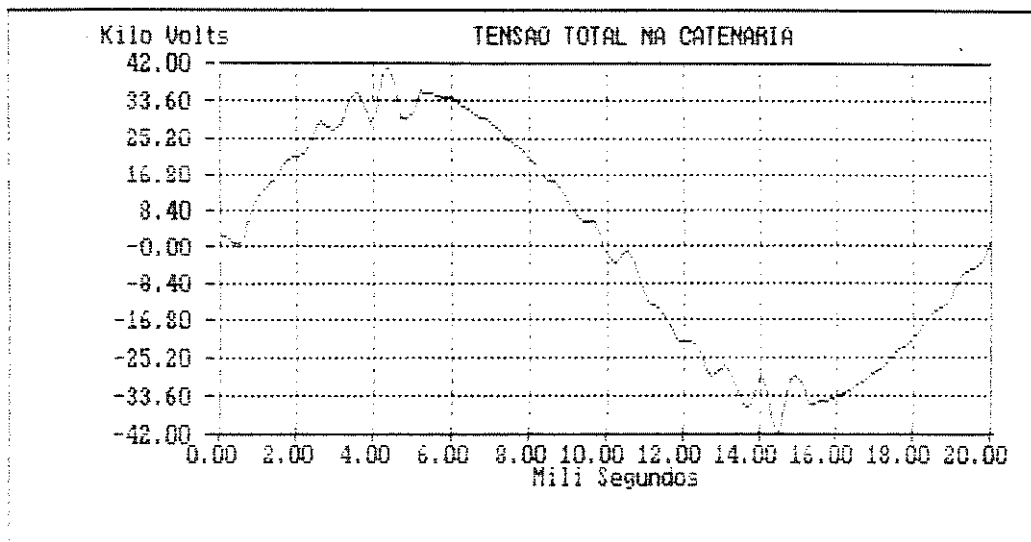


fig. 5.22 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 90^\circ$

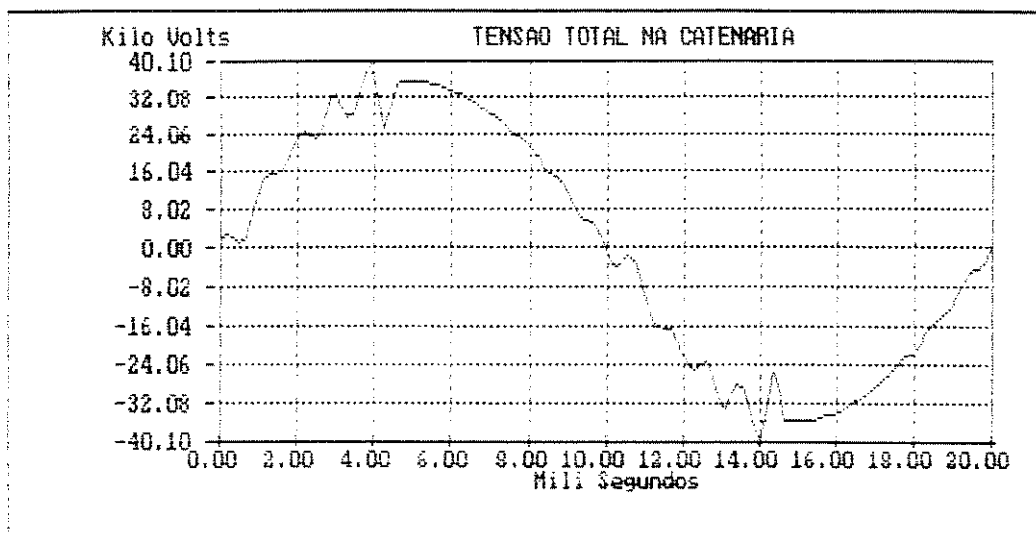


fig. 5.23 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 80^\circ$

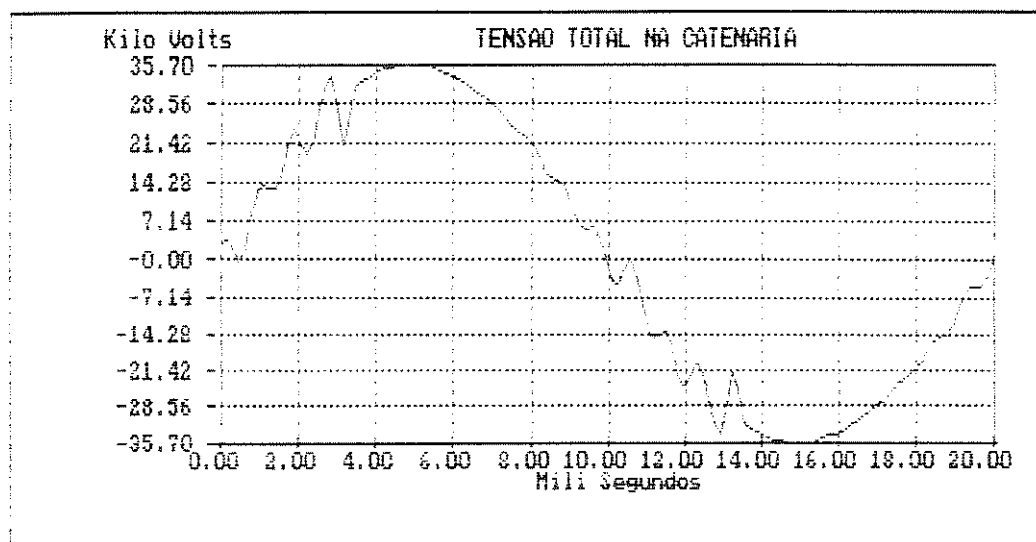


fig. 5.24 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 60^\circ$

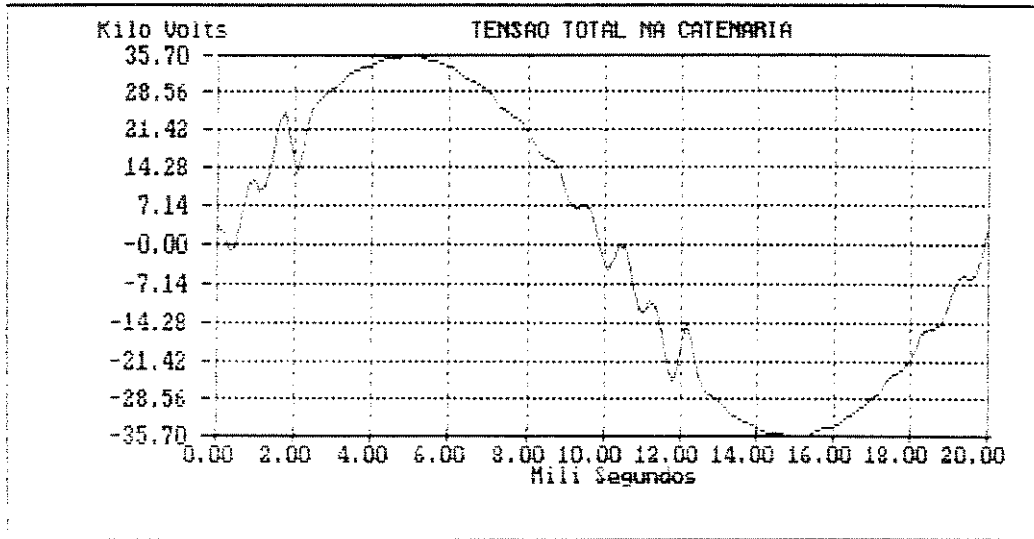


fig. 5.25 - ângulo de gatilhamento  $\alpha = 40^\circ$

Caso 3b: Caso 1b utilizando filtro.

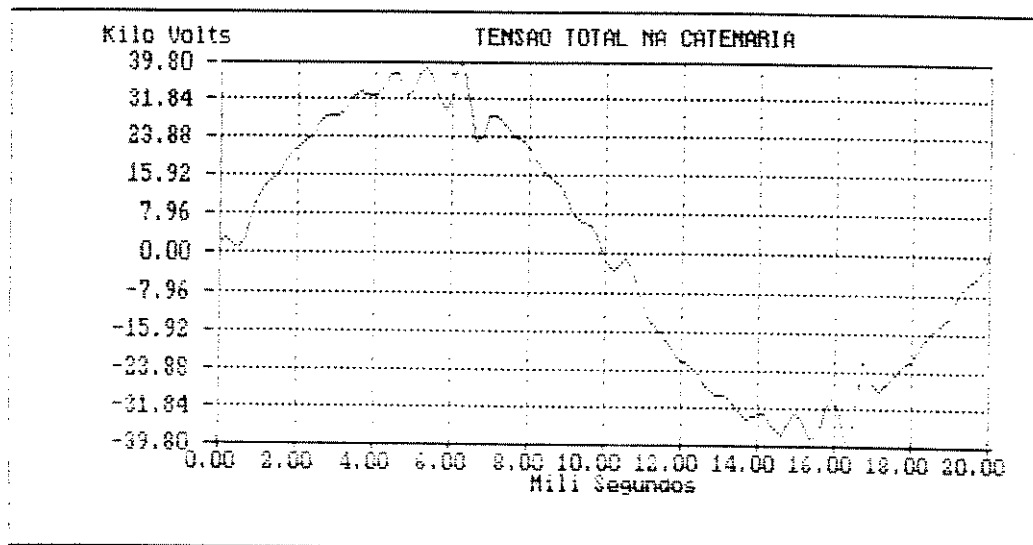


fig. 5.26 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 122.15^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

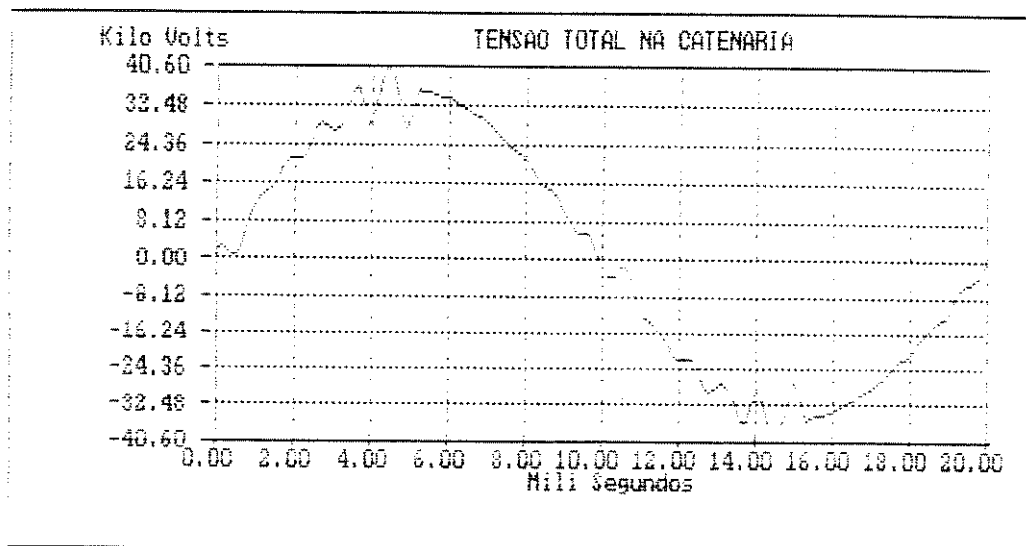


fig. 5.27 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 90^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

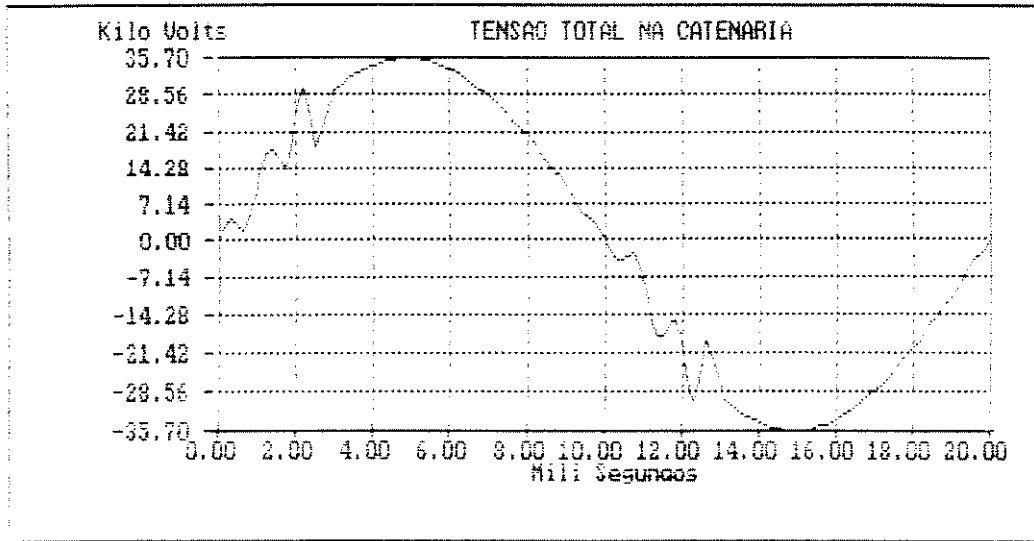


fig. 5.28 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 49,25^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

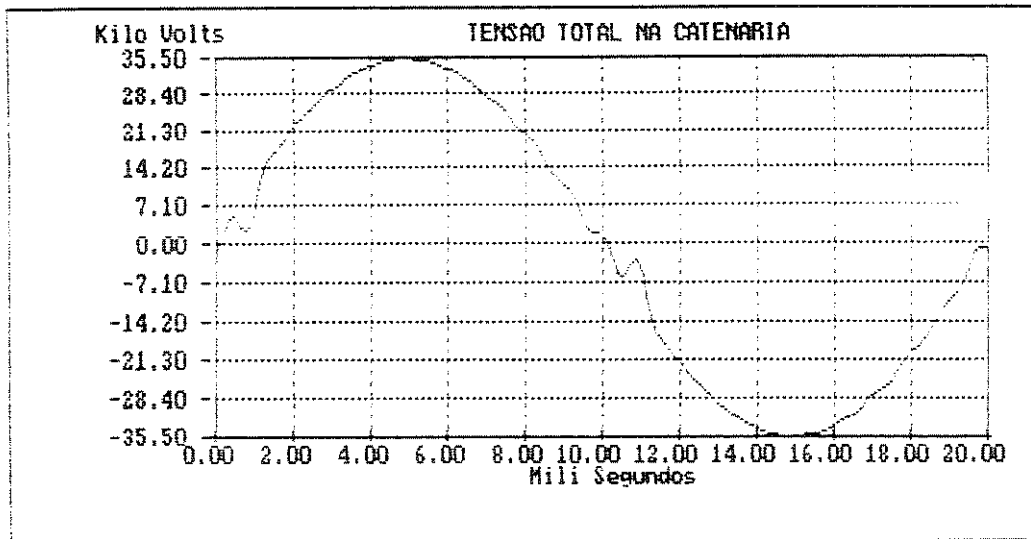


fig. 5.29 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$



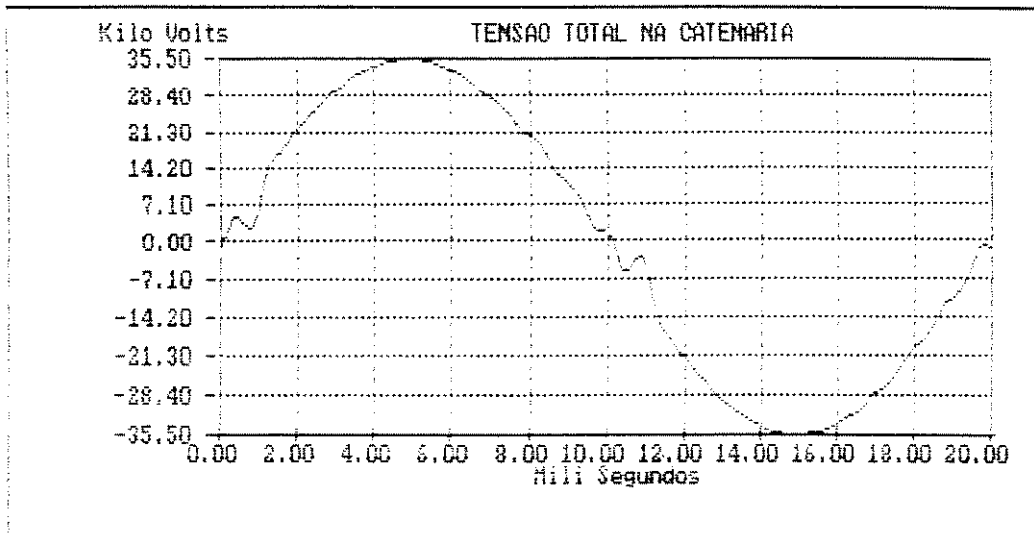


fig. 5.30 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 130,75^\circ$

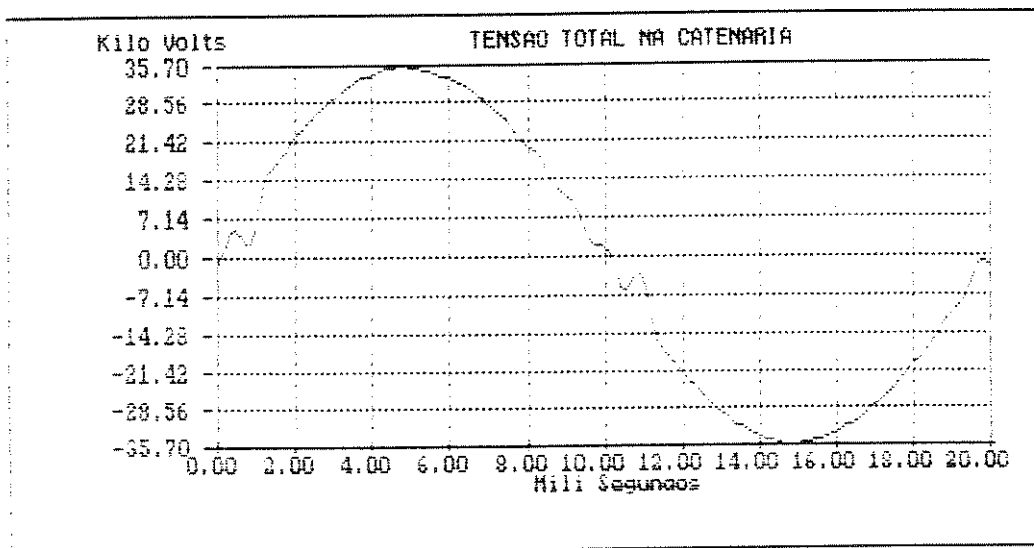


fig. 5.31 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 90^\circ$

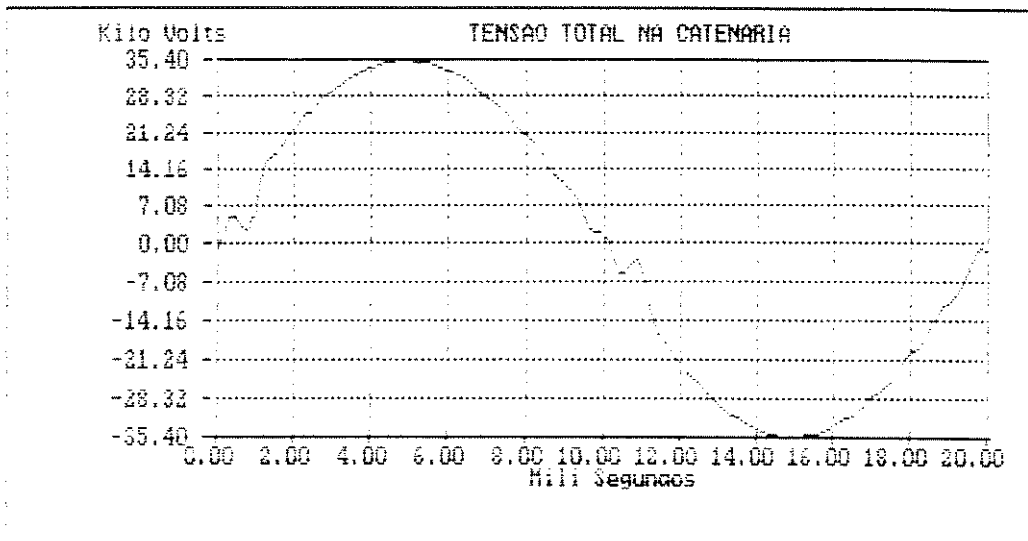


fig. 5.32 - ângulos de gatilhamento  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 57,85^\circ$

O objetivo, nesta parte do trabalho, é verificar se o programa responde bem à presença de filtro na linha. Não houve a preocupação de fazer um projeto rigoroso do filtro. Entretanto, para ilustrar o comportamento da tensão da linha de contato, com a inserção de filtro, adotou-se um filtro tipo RC, instalado no fim do trecho em estudo. Ao efetuar o cálculo dos parâmetros desse filtro, considerou-se que a ressonância do sistema de alimentação para a tração, ocorre na frequência onde o cálculo da admitância total apresenta o menor valor (em torno da 23ª harmônica da fundamental) e considerou-se, ainda, que a resistência deveria assumir um valor alto (em torno de 2 k $\Omega$ ), para que a corrente no ramo do filtro não seja muito elevada. Deste modo, obteve-se para a capacitância do filtro, um valor em torno de 9,6 pF.

### 5.3 - Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se os resultados, obti-

dos através da aplicação do procedimento desenvolvido no trabalho, para o cálculo da forma de onda tensão presente na linha de contato, na posição em que a locomotiva se encontra.

Inicialmente, apresentou-se as formas de onda da tensão da linha de contato para a situação mais crítica, ou seja, ressonância no sistema que alimenta a locomotiva, numa frequência levemente superior a 1 kHz, com a locomotiva posicionada no fim do trecho, abrigando internamente um conversor c.a./c.c. de um estágio. Em seguida, apresentou-se as formas de onda da tensão para uma outra situação semelhante à anterior, porém utilizando-se um conversor de dois estágios. Como foi descrito no trabalho, estas formas de onda apresentam um grau de perturbação menor que as formas de onda da situação anterior.

Apresentou-se, também, as formas de onda da tensão para as situações anteriores, considerando-se a inserção de um filtro RC na terminação aberta da linha, como recomendam estudos realizados por pesquisadores da área.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

No capítulo V foram apresentadas formas de onda da tensão na linha de alimentação, para diversas situações características de posicionamento da locomotiva e de ângulo de gatilhamento dos tiristores. Também puderam ser obtidos resultados quando estão instalados filtros para amenizar o efeito de picos de sobre-tensão eventualmente presentes na ausência dos mesmos. Todos esses resultados apresentados foram obtidos a partir da análise da corrente que a locomotiva retira da sua linha de alimentação, conforme procedimento detalhado no capítulo IV. Isso significa que o objetivo inicial - obter um procedimento para efetuar a análise da corrente e daí chegar ao exame de sobretensões - foi plenamente alcançado.

Deve-se ressaltar que alguns dos resultados apresentados, que já são bastante conhecidos na bibliografia mencionada ao final da tese, servem para confirmar que realmente se conseguiu obter a metodologia de análise desejada. Essa metodologia, nos trabalhos apenas mencionada nos seus contornos básicos, teve que ser detalhada e minuciosamente desenvolvida, sendo esta a contribuição deste trabalho e o seu objetivo fundamental, agora plenamente alcançado. Também há de se notar que não foi realizada nenhuma implementação física do sistema em laboratório. Isto não estava, como previsto desde o início, na proposta de trabalho de tese. Este tipo de implementação já fora feito por outros autores de trabalhos mais abrangentes [1,2,3]. A comparação dos resultados de simulação com os correspondentes obtidos em laboratório apresentou correlação satisfatória.

Mesmo tendo apresentado uma boa aproximação com outras metodologias que estudam os fenômenos associados ao sistema de tração, o procedimento para análise da tensão da linha de contato, apresentado neste trabalho, não explorou alguns aspectos desse sistema, em sua profundidade máxima. Assim sendo, alguns estudos podem ser efetuados, visando aprimorar esse procedimento de análise, aproximando-o ainda mais do comportamento verificado na realidade. Dentre esses estudos, destacam-se:

i) utilizar na equação 3.11 uma força contraeletromotriz com característica pulsada, do tipo  $e_2(t) = E_2(1 + \cos \omega t)$ , ao invés de uma fonte de tensão contínua;

ii) considerar o efeito da variação da indutância da linha de contato, bem como a variação da resistência equivalente às perdas no transformador da subestação, com a frequência, e;

iii) considerar a interação entre o sistema de alimentação para a tração e a locomotiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1 ] SOUZA, C.R. " Uma contribuição às investigações das sobretensões causadas em uma linha de alimentação monofásica por locomotivas controladas a tiristores ", Tese de Doutorado, UNICAMP, 1987.
  
- [ 2 ] MISKULIN, M.S. " An investigation of hole-storage transients. A contribution of the protection requirements for semiconductors in thyristor-controlled locomotives ", PhD. Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1980.
  
- [ 3 ] MORRISON, R.E., STUART, M. " Harmonic Overvoltages on 50 kV Traction Systems ", International Conference on Harmonics in Power Systems, England, September 1981.
  
- [ 4 ] SUBJAK, J.S., McQUILKIN, J.S. " Harmonics-Causes, Effects, Measurements and Analysis: An Update ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, NO. 6, november/december 1990.
  
- [ 5 ] HOWROYD, D.C. " The implication of the introduction of thyristors into ac traction systems ", Railway Engineers Forum, MARCH 1972.
  
- [ 6 ] MORRISON, R.E., BARLOW, M.J. " Continuous overvoltages on a.c. traction systems ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
  
- [ 7 ] MELLITT, B., MWANDOSYA, M.J. " Input characteristics of naturally commutated single-phase asymmetrical convertors ", IEE PROC., Vol. 127, Pt. B, No. 2, MARCH 1980.

- [ 8 ] PERIN, J.A. " Manual de utilização do programa SACEC ",  
Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto 1988.
- [ 9 ] GRAF, R. " Problems associated with the phase-angle  
control of locomotives in contact wire networks ",  
Brown Boveri Rev., nº 12, 1977.
- [ 10 ] ELGERD, O.I. " Electric Energy Systems Theory An  
Introduction ", Mc Graw Hill, 1971.

#### BIBLIOGRAFIA

- [ 11 ] HOWROYD, D.C. " Public-supply-system distortion and  
unbalance from single-phase a.c. traction ", IEE  
PROC., Vol. 124, No. 10, OCTOBER 1977.
- [ 12 ] MARKHAM, J.D. " AC thyristor controlled vehicles ",  
BALDWIN, D. " Total systems concepts for ac  
traction ", GARSIDE, G. " A review of recent  
developments in train control techniques ", Anais do  
GEC Symposium on developments in Electric Traction,  
Londres, 1976.
- [ 13 ] LITTLER, G.E. " The performance of an a.c. electrified  
railway system at harmonic frequencies ", Electrical  
Energy Conference, 1979.
- [ 14 ] YACAMINI, R., HAMOUD, O.A.R. " Modelling of traction  
load distortion in electricity supply systems ", IEE  
PROC., Vol. 128, Pt. B, No. 3, MAY 1981.
- [ 15 ] OKORO, C.C. " Performance evaluation of a DC motor fed  
from an asymmetrical single-phase bridge ", IEE  
PROC., Vol. 129, Pt. B, No. 5, SEPTEMBER 1982.
- [ 16 ] MORRISON, R.E., CORCORAN, J.C.W. " Specification of an  
overvoltage damping filter for the National Railways  
of Zimbabwe ", IEE PROC., Vol. 136, Pt. B, No. 6,

- [ 17 ] SHIPP, D.D. " Harmonic Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, NO. 5, september/october 1979.
  
- [ 18 ] YACAMINI, R., HAMOUD, O.A.R., AFACAN, O. " Modelling of traction load distortion in electricity supply systems ", IEE PROC., Vol. 128, Pt. B, No 3, MAY 1981.
  
- [ 19 ] CASE, S.H. et ali " Electrification of Taiwan main-line railway from Keelung to Kaohsiung ", IEE PROC., Vol. 130, Pt B, No 5, SEPTEMBER 1983.



## APÊNDICE A

### COMPARAÇÃO ENTRE CONVERSORES DE UM E DOIS ESTÁGIOS

De acordo com o mencionado no trabalho, o desempenho de um conversor CA/CC constituído de duas pontes retificadoras assimétricas semi-controladas a tiristores ligadas em cascata é, em termos de conteúdo harmônico da sua corrente de entrada, melhor que o conversor que possui apenas uma. Para certificar-se disso, é necessário efetuar uma equivalência entre os gatilhamentos dos tiristores de ambos os conversores.

O valor médio da tensão que é fornecida pelo conversor de um estágio é dado pela expressão:

$$E_{1e} = \frac{V_{\max} (1 + \cos\alpha)}{\pi} \quad (\text{A.1})$$

Para um conversor de dois estágios, tem-se:

$$E_{2e} = \frac{1}{2} \frac{V_{\max} (1 + \cos\alpha_1)}{\pi} + \frac{1}{2} \frac{V_{\max} (1 + \cos\alpha_2)}{\pi} \quad (\text{A.2})$$

Para obter a equivalência desejada entre os gatilhamentos dos conversores, iguala-se os valores médios de  $E_{1e}$  e  $E_{2e}$ , obtendo-se a seguinte expressão:

$$\cos\alpha = \frac{1}{2} (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \quad (\text{A.3})$$

Para ilustrar que um conversor de dois estágios apresenta uma melhora no fator de potência em relação à um conver-

tor de um único estágio, ao considerar-se a equivalência dos gatilhamentos e, tomando-se, por exemplo,  $\alpha = 90^\circ$  e fixando-se  $\alpha_1 = 0^\circ$  obtém-se um ângulo  $\alpha_2 = 180^\circ$ . Simulando-se a operação de ambos os conversores, obtém-se as curvas para as tensões e correntes de entrada mostradas na figura A.1. Desse modo, é possível visualizar as defasagens existentes entre a tensão (linha tracejada) e a corrente (linha contínua) de entrada de ambos os conversores.

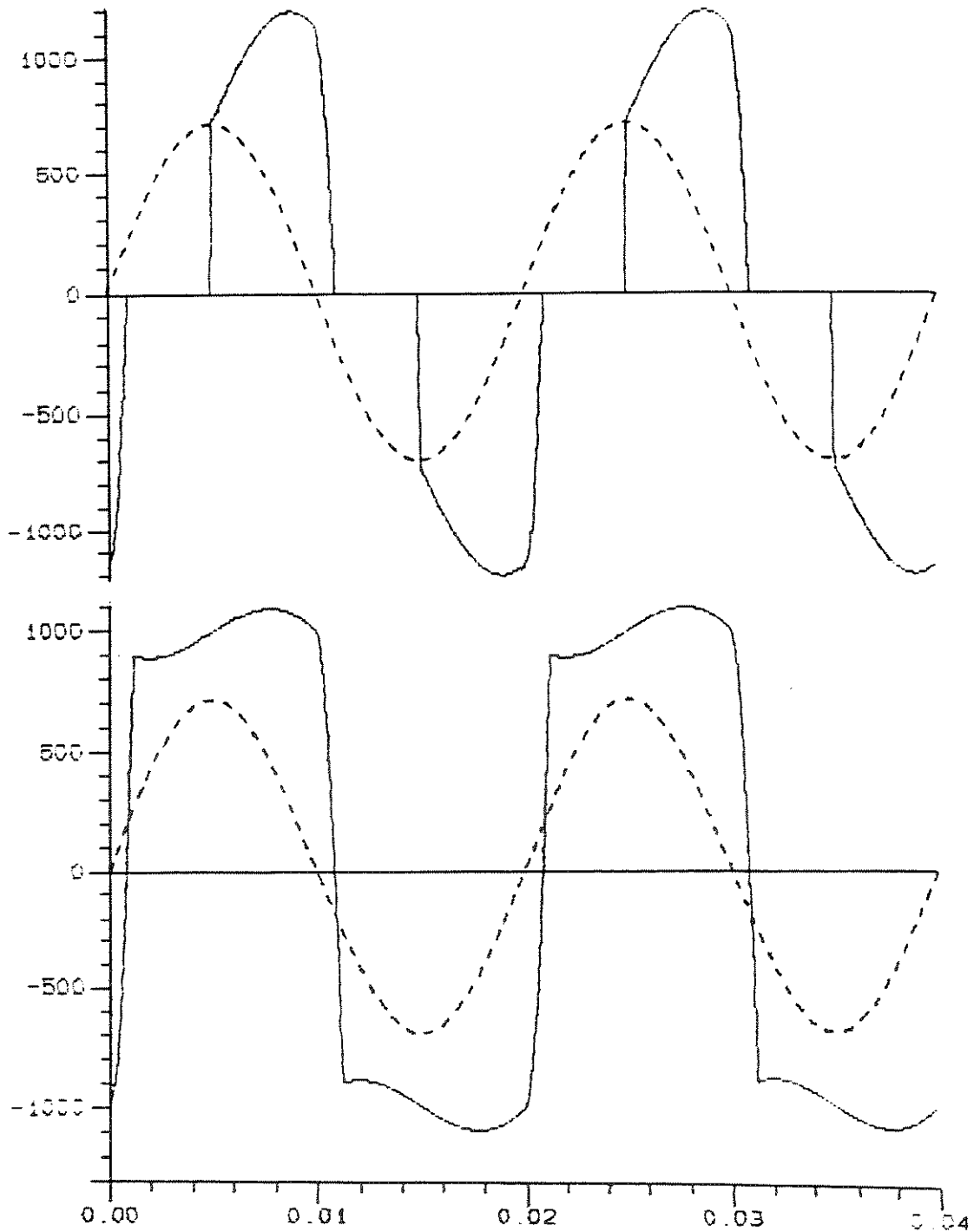


fig. A.1 - correntes e tensões de entrada para os conversores

## APÊNDICE B

### APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA GLOBAL AO RAMO DA LOCOMOTIVA

#### B.1 - Introdução

Com o propósito de prover dados ao procedimento de obtenção da tensão da linha de contato, descrito no capítulo IV, implementou-se dois modelos para a locomotiva. O primeiro deles, contempla um conversor c.a./c.c. composto de uma ponte tiristorizada assimétrica semicontrolada e o segundo modelo, considera um conversor c.a./c.c., utilizando duas das referidas pontes ligadas em cascata.

A simulação desses dois modelos, ou seja, a obtenção da forma de onda distorcida da corrente absorvida pela locomotiva, no domínio do tempo e no domínio da frequência, pela via digital, foi efetuada pelos programas do SACEC, cuja metodologia foi descrita no capítulo III. Na implementação dos modelos para a locomotiva, foram considerados os dados apresentados no capítulo V.

#### B.2 - Modelo Para o Conversor de Um Estágio

A figura B.1 mostra o circuito equivalente para o conversor de um estágio e na figura B.2 é apresentada a simulação da corrente na entrada desse conversor, para um gatilhamento de  $90^\circ$ . O valor da fonte de tensão contínua, que no circuito equivalente da figura B.1 representa a força contraeletromotriz do motor de corrente contínua, necessária para manter constante a corrente de armadura desse motor, deve variar conforme o ângulo de gatilhamento dos tiristores e pode ser calculado pela expressão:

$$E_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot 1000 \cdot (1 + \cos \alpha)}{\pi} - (2,24 \cdot 10^{-3} + 0,1) \cdot 1000 \quad (B.1)$$

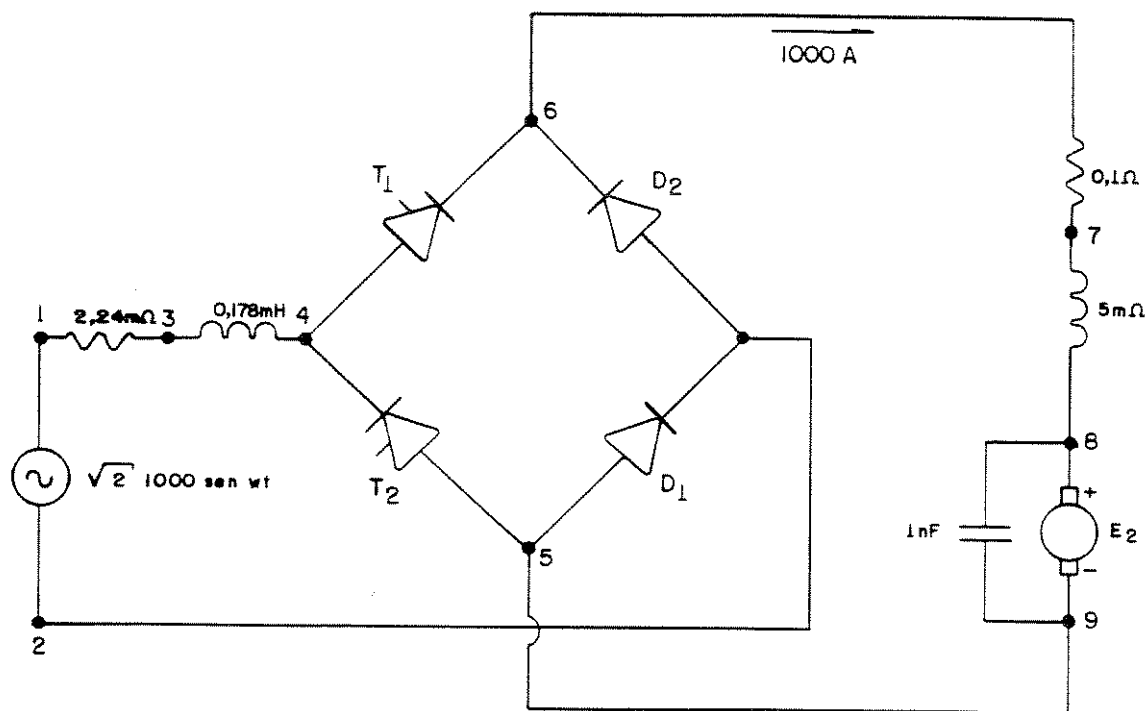


fig. B.1 - circuito equivalente para a locomotiva com um estágio

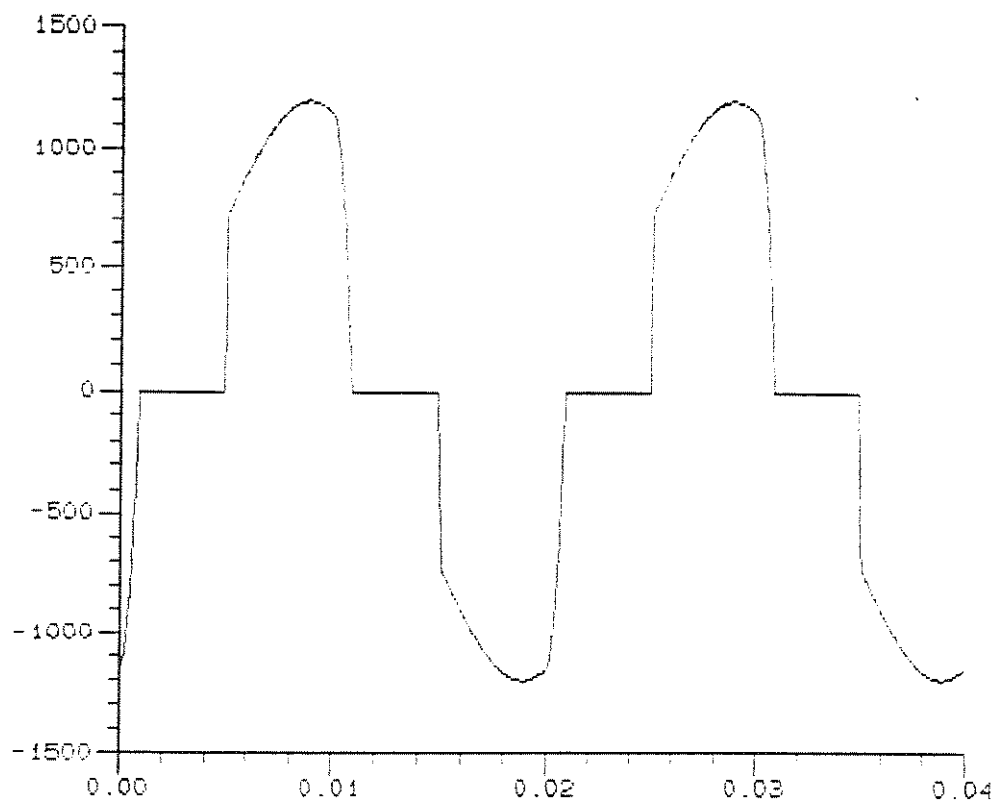


fig. B.2 - corrente na entrada do conversor c.a./c.c.

### B.3 - Modelo Para o Conversor de Dois Estágios

Na simulação do funcionamento da locomotiva, considerando um conversor de dois estágios, deve-se proceder algumas modificações nos dados a fim de se obter os resultados desejados. Assim, o valor máximo da tensão bem como os valores dos parâmetros da impedância do transformador da locomotiva, são divididos pelo número de estágios do conversor, para este caso, dois. A figura B.3 exibe o circuito equivalente necessário para proceder-se a simulação e na figura B.4 é mostrada a corrente de entrada desse conversor, considerando-se gatilhamentos para os tiristores, por exemplo,  $\alpha_1 = 0^\circ$  e  $\alpha_2 = 180^\circ$

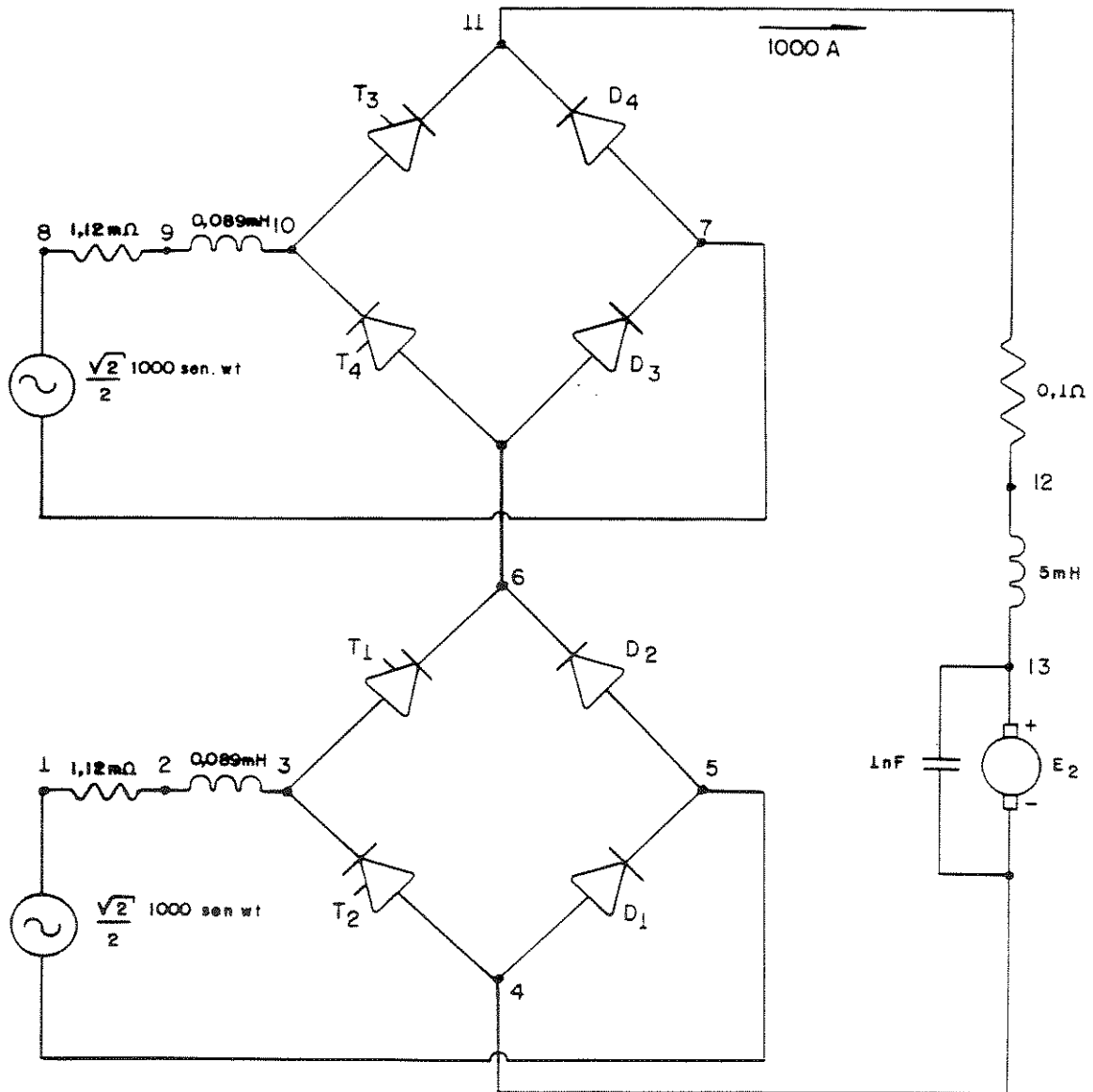


fig. B.3 - circuito equivalente para um conversor de dois estágios

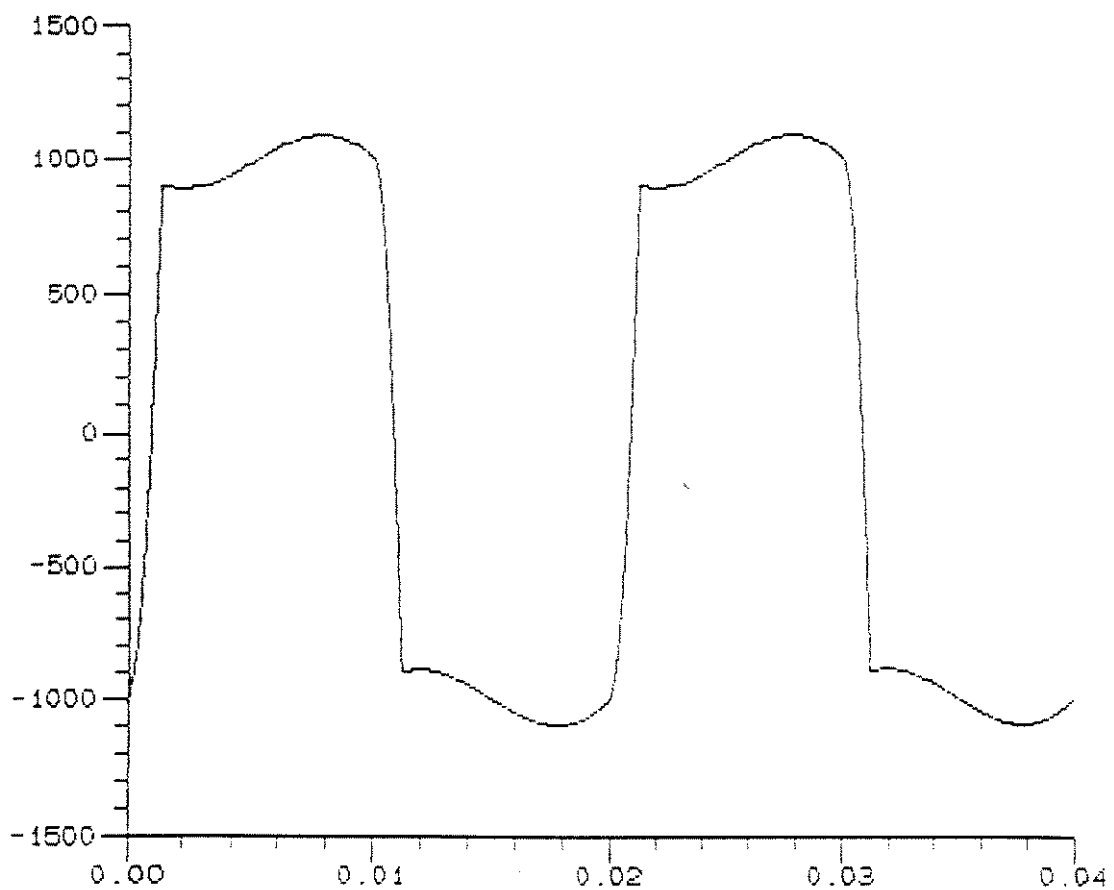


fig. B.4 - corrente de entrada do conversor de dois estágios

A obtenção da corrente no domínio da frequência, através do programa PAH, que compõe o pacote de programas do SACEC, está detalhada no capítulo IV.