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

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Carlos Rodrigues de Souza e aprovada pela comissão julgadora em 24/04/87

UMA CONTRIBUIÇÃO AS INVESTIGAÇÕES DAS SOBRETENSÕES CAUSADAS EM UMA LINHA DE ALIMENTAÇÃO MONOFASICA POR LOCOMOTIVAS CONTROLADAS A TIRISTORES

CARLOS RODRIGUES DE SOUZA

ORIENTADOR:
PROF. Dr. MAURO SERGIO MISKULIN

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ABRIL 1987

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Dedico este trabalho
à minha esposa e filha
aos meus pais

AGRADECIMENTOS

- Ao professor MAURO SERGIO MISKULIN, pela orientação do trabalho, pelas sugestões oportunas, pela dedicação, incentivo, disponibilidade e amizade demonstradas durante a elaboração desta pesquisa,

- Aos professores Ariovaldo Verândio Garcia e Carlos Alberto Favarin Murari, pelo apoio no cálculo digital,

- Ao professor José Geraldo Chiquito, pelas sugestões interessantes para o cálculo de transitórios em linhas de transmissão,

- Aos demais colegas da Faculdade de Engenharia Elétrica, pelo apoio e incentivo,

- Ao companheiro Warley Wilton Vianna Pinto, pelo trabalho de digitação de uma parte do texto,

- A eficiente secretária da Faculdade de Engenharia Elétrica, Elza Maria Cotegipe, pela elaboração e orientação dos trabalhos de edição dos originais nos microcomputadores, e pela amizade,

- As companheiras Ester e Cida, pelo apoio na datilografia de figuras,

- A todos aqueles, que de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A eletrificação de ferrovias com corrente alternada monofásica de frequência industrial vem se firmando, em muitos países do mundo, como sendo a opção mais interessante para o planejamento de novas linhas. Mesmo em um país como o Brasil, onde já existe implantado um sistema ferroviário eletrificado com corrente continua, esta opção já está sendo considerada. Não existe no Brasil presentemente nenhum sistema deste tipo que esteja inteiramente implantado. Mas mesmo nos países em que este já opera a muito tempo, investigações científicas vem sendo conduzidas com o objetivo de contornar alguns problemas operacionais que podem, em determinadas circunstâncias, comprometer seriamente o funcionamento da ferrovia. Este trabalho é dedicado ao exame de um destes problemas: o aparecimento de sobretensões na linha de alimentação das locomotivas.

Após fazer a apresentação de um breve histórico deste tipo de eletrificação ferroviária, procede-se a conceituação do sistema de tração, salientando-se aqueles aspectos que são fundamentais para o estudo em questão. Em seguida são discutidas as circunstâncias em que as mencionadas sobretensões podem vir a ser observadas no sistema. O próximo passo consiste em discutir os possíveis enfoques que permitam fazer a abordagem do problema pelas vias de análises disponíveis. Neste caso, o problema foi analisado através do cálculo digital e pela via da simulação analógica.

Dispondo-se de um procedimento para a constatação da presença de sobretensões, procede-se uma avaliação de sua magnitude. Se for o caso, passa-se ao exame das formas de controle visando-se obter uma redução de seus efeitos. O uso de filtros na linha de contato é então considerado e a sua localização ao longo do trecho é investigada. Finalmente são apresentadas as conclusões do estudo considerado.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - Breve Histórico da Eletrificação Ferroviária com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Industrial 1.1

1.1 - Introdução 1.1
1.2 - Eletrificação com Corrente Contínua 1.3
1.3 - Eletrificação com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Especial 1.4
1.4 - Eletrificação com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Industrial 1.6
1.5 - A Eletrificação de Ferrovias Brasileiras com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Industrial ... 1.9
1.6 - Conclusões 1.11

CAPÍTULO II - O Sistema de Tração com Alimentação Monofásica 2.1

2.1 - Apresentação do Sistema 2.1
2.2 - Funcionamento da Locomotiva 2.7
2.3 - Outras Considerações 2.12

CAPÍTULO III - Sobretensões na Linha de Alimentação ... 3.1

3.1 - A Característica da Tração Elétrica como Carga 3.1
3.2 - A Origem das Sobretensões na Linha de Contato 3.2
3.3 - Cálculo de Sobretensões na Linha de Alimentação 3.4

3.3.1 - A Avaliação Digital da Tensão 3.5
3.3.2 - A Avaliação Analógica da Tensão 3.7
3.4 - Proposição de um Modelo para a Simulação do Sistema de Tração pela Via Digital 3.8
3.5 - Considerações Acerca do Problema a ser Resolvido 3.14

CAPÍTULO IV - Perfil de Tensões ao Longo da Linha de Contato 4.1

4.1 - Aplicação do Método de Ondas Viajantes 4.1
4.2 - Os Princípios do Método de Schnyder-Bergeron 4.2
4.3 - A Aplicação do Método de Schnyder-Bergeron 4.5
4.4 - Implementação do Procedimento para Cálculo de Tensões 4.20
4.5 - Perfil de Tensões Através de Expressões Analíticas 4.23

CAPÍTULO V - Controle de Sobretensões na Linha de Contato 5.1

5.1 - Redução de Sobretensões Via Instalação de Filtros 5.2
5.2 - Cálculo da Frequência de Ressonância 5.4
5.3 - Cálculo do Perfil de Tensões na Presença de Filtros 5.6
5.4 - Implementação do Procedimento para Cálculo de Tensões 5.14

CAPÍTULO VI - Simulador Analógico para o Sistema de Tração 6.1

6.1 - Potencialidade do Simulador Analógico 6.1
6.2 - Implementação do Simulador Analógico 6.3
6.2.1 - Configuração e Parâmetros dos Sistemas a serem Representantes 6.4
6.2.2 - Configuração do Sistema com Parâmetros Escalonados 6.7
6.2.3 - Modelamento da Linha de Transmissão 6.10
6.2.4 - Implemtação do Modelo da Locomotiva 6.12
6.3 - Características e Aplicações do Simulador 6.19
6.3.1 - Formas de Onda de Correntes 6.20
6.3.2 - Formas de Onda de Tensões 6.23
6.3.3 - Variação de Parâmetros do Simulador 6.26
6.3.4 - Conclusões 6.32

CAPÍTULO VII - Aplicações e Resultados Obtidos 7.1

7.1 - Considerações Iniciais 7.1
7.2 - Detecção de Sobretensões na Linha de Contato 7.3
7.3 - Detecção de Sobretensões Via Expressões Analíticas 7.6
7.4 - Uso de Filtros na Redução do Nível de Sobretensões 7.11
7.4.1 - Escolha do Tipo de Filtro a ser Utilizado 7.12

7.4.2 - Definição de Parâmetros do Filtro pela Via Analógica 7.12
7.4.3 - Estudo da Alocação do Filtro 7.15
7.4.4 - Definição de Parâmetros do Filtro pela Via Digital 7.21

CAPÍTULO VIII - Conclusões 8.1

APÊNDICE I - Representação Digital do Ramo RL I.1

APÊNDICE II - Atualização dos Valores de E_{2j} e E_{2j-1} ... II.1

APÊNDICE III - Representação Digital do Ramo RC III.1

REFERÊNCIAS Ref.1

CAPÍTULO 1

BREVE HISTÓRICO DA ELETRIFICAÇÃO FERROVIÁRIA COM CORRENTE ALTERNADA MONOFÁSICA DE FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

1.1 - Introdução

Sempre que se planeja a implantação de um sistema de eletrificação ferroviária, a tarefa de definir o circuito de tração impõe a necessidade de que se leve em conta tanto o transporte de energia elétrica através da linha de contato quanto a utilização desta energia pelo veículo motor. Desta forma, não apenas é necessário encontrar a maneira mais adequada e racional para efetuar o transporte de energia até o veículo motor, como também é fundamental que se possa assegurar a este veículo a possibilidade de utilizar, da forma mais direta possível, o tipo de alimentação posta à sua disposição. Diversos autores [1, 2] costumam atribuir a existência de mais de uma forma de eletrificação à não observância destas considerações. Observam que a decisão acerca do transporte e da utilização da energia nem sempre é tomada considerando-se conjuntamente estes dois aspectos que, caso não sejam tratados ao mesmo tempo, e pela mesma equipe técnica, podem levar a soluções que valorizam um dos aspectos em detrimento do outro e em prejuízo do resultado global.

De fato, observando-se os sistemas ferroviários eletrificados que se encontram em operação na atualidade pelos diversos países do mundo verifica-se a existência, quanto à forma de eletrificação, de três tipos de sistemas:

- Sistemas eletrificados em corrente contínua.
- Sistemas eletrificados em corrente alternada monofásica de

frequência especial.

- Sistemas eletrificados em corrente alternada monofásica de frequência industrial.

É necessário entender que este fato simplesmente significa que, com o correr do tempo, as exigências colocadas pelo crescente desenvolvimento da tração elétrica foram sendo satifeitas através de soluções diferentes, em função do desenvolvimento tecnológico alcançado na área dos equipamentos de tração. Então, em termos das possibilidades tecnológicas desta área, e em termos das exigências da tração, cada uma destas formas de eletrificação reflete a solução mais adequada que foi possível encontrar à época da implantação das mesmas.

Em alguns países (sobretudo na Europa ocidental) estas três modalidades de eletrificação coexistem. Isto significa que, quando houve necessidade de expandir a malha ferroviária destes países, a solução adotada atendeu aos mais recentes avanços tecnológicos verificados na tração elétrica. O fato de que muitos países continuem hoje operando ferrovias eletrificadas no passado, segundo a melhor opção então disponível, não deve significar que as ferrovias atuais devam ser eletrificadas segundo a mesma opção, agora ultrapassada. Examinando-se atualmente os sistemas de eletrificação existentes é possível tirar duas conclusões importantes:

- Os sistemas eletrificados com corrente contínua ao nível de 1500 V e os sistemas monofásicos de frequência especial não tem mais nenhuma razão de serem considerados para as eletrificações futuras.

- Os sistemas monofásicos de frequência industrial tem sido aqueles que maior desenvolvimento tem apresentado nos últimos tempos.

Para perceber as razões do notável desenvolvimento da eletrificação monofásica de frequência industrial e entender a superação dos sistemas de 1500 V em corrente contínua e do sistema monofásico de frequência especial, é necessário proceder

um breve exame da evolução da eletrificação ferroviária.

1.2 - Eletrificação com Corrente Contínua

No início da era da eletrificação de ferrovias, as catenárias eram eletrificadas com corrente contínua, uma solução que já vinha anteriormente sendo adotada nas linhas de transporte urbano, com muito sucesso. O motor empregado na tração era a máquina de corrente contínua, a qual tem características bastante adequadas para as exigências da tração elétrica. Quando ocorreram as primeiras aplicações desta eletrificação (em 1881, na Alemanha; em 1883, na Grã-Bretanha e em 1895, nos Estados Unidos) eram utilizadas na catenária magnitudes de tensão relativamente baixas (entre 500 e 600 V) porque o desenvolvimento tecnológico até então alcançado não permitia construir motores capazes de operar satisfatoriamente sob tensões de magnitudes mais elevadas. Mas estas dificuldades foram sendo superadas e, já em 1920, foi possível a um grupo de países europeus e asiáticos adotar o nível de 1500 V como tensão padronizada para uso em seus projetos futuros de eletrificação. Mais tarde, em razão das pesquisas realizadas entre 1914 e 1927, nos EUA, pela Chicago-Milwaukee-St. Paul and Pacific Railroad, foi possível iniciar a eletrificação com 3000 V, em diversos países europeus.

Sabe-se que a vantagem da eletrificação em corrente contínua reside na possibilidade de utilizar um excelente motor - o motor de corrente contínua - cujo controle de tensão, feito a bordo da locomotiva, é tão simples que o motor pode ser utilizado da forma mais direta possível. Entretanto, em razão das severas limitações a que fica sujeito o projeto destes motores, não existe interesse em elevar a tensão do motor acima da magnitude de 1500 V atualmente utilizada. Entende-se, por outro lado que 3000 V não pode ser considerada uma magnitude de tensão compatível com a ordem de grandeza das tensões normalmente empregadas no transporte de energia elétrica [3]. Como não é muito

prático efetuar o desacoplamento entre a tensão da catenária e a tensão do motor, começam a aparecer dificuldades à medida que o sistema cresce. Por exemplo, as correntes da catenária acabam atingindo intensidades muito elevadas, tornando-se necessário especificar condutores de calibre cada vez maior, acarretando linhas aéreas pesadas e caras. Há também o problema das subestações. Estas, além de sua conhecida complexidade, precisam ser criteriosamente espaçadas de modo que não sobrevenham quedas de tensão proibitivas na linha de contato. Caso contrário, o rendimento da instalação pode ficar seriamente comprometido. Evidentemente, não é possível diminuir o espaçamento entre as subestações sem elevar o nível de tensão da catenária. Para as eletrificações a 1500 V, em que é exigida, em média, uma subestação a cada 20 Km, o número de unidades (e, consequentemente, o custo) pode tornar-se muito elevado. Este fato, em presença de outras alternativas que foram surgindo, inviabilizou o emprego de 1500 V na catenária. A operação com 3000 V é bastante mais razoável e continua a ser utilizada, apesar do baixo nível de tensão. Mas o desenvolvimento da eletrificação caminha em direção ao uso de tensões mais elevadas na catenária.

1.3 - Eletrificação com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Especial.

No sistema eletrificado em corrente contínua, o uso da energia está privilegiado em relação ao seu transporte. A idéia de energizar a linha de contato com corrente alternada visa possibilitar a elevação da tensão da catenária a níveis mais condizentes com o transporte de energia porque se deseja obter catenárias mais leves, menos custosas e diminuir o número de subestações, através do aumento do espaçamento entre as mesmas. Estas subestações devem também ser menos complexas do que as subestações utilizadas em corrente contínua. Através do uso de transformador, agora é possível fazer o desacoplamento entre a tensão da catenária e a tensão do motor. Assim, pode-se ajustar

independentemente a magnitude de cada tensão ao nível mais adequado.

Deve-se ao trabalho de Lamme, em 1900 nos Estados Unidos, a primeira iniciativa concreta de fazer a eletrificação de ferrovias com corrente alternada monofásica [2]. A mudança do tipo de eletrificação de contínua para alternada veio aprimorar muito o sistema, a nível do transporte de energia. Entretanto, foi necessário fazer alguma mudança ao nível de utilização porque, nas novas condições, o motor monofásico série a coletor passou a ser a máquina mais indicada para a tração. O trabalho de Lamme consistiu precisamente em aprimorar o processo de comutação nestes motores com o fim de superar esta dificuldade que vinha atrasando a implementação da tração monofásica nos Estados Unidos.

É evidente que sempre se desejou eletrificar as catenárias com corrente monofásica de frequência industrial (50 Hz em muitos países e 60 Hz em outros) porque já existia, por toda parte, uma rede nacional de transporte de energia operando nesta frequência. Havia interesse em que o sistema de tração fosse alimentado diretamente por esta rede que já estava mais ou menos desenvolvida em muitos países. No entanto, naquela época ainda não existiam condições tecnológicas para o funcionamento do motor monofásico a coletor em frequência industrial. Tampouco havia a intenção de procurar um outro motor como alternativa, uma vez que, a menos da frequência, este era mesmo o motor mais indicado. Assim, a solução encontrada foi operar com uma frequência especial de magnitude reduzida em relação à frequência industrial (16 2/3 Hz, na Europa e 25 Hz, nos EUA). Deve-se observar, entretanto, que, por volta de 1900 (na Suiça e na Alemanha), já estavam sendo realizadas pesquisas visando empregar o motor monofásico a coletor diretamente na rede de frequência industrial. Mas as linhas experimentais existentes na Europa entre 1901 e 1905 operavam com frequência especial.

Embora as linhas americanas operassem com 11 kV e 25 Hz, o sistema que se desenvolveu na Europa, por volta de 1920, em paralelo com o sistema de corrente contínua, era ener-

gizada com 15 kV e 16 2/3 Hz.

Mesmo tendo representado um desenvolvimento importante para a eletrificação ferroviária, a tração monofásica com frequência especial apresentou alguns inconvenientes que, devidamente ponderados à luz de outras opções mais modernas, praticamente inviabilizam esta alternativa para as eletrificações futuras. Antes de mais nada, existe o problema de frequência que dificulta a conexão direta do sistema de tração à rede nacional. Este fato exige o estabelecimento de uma rede especial de geração e transporte operando com frequência reduzida (como ocorre na Alemanha, Austria e Suiça) ou, no mínimo, impõe a necessidade de instalar conversores de frequência nas subestações. Quanto ao motor de tração, este cada vez foi se tornando mais complexo, mais pesado e mais caro do que o motor de corrente contínua de mesma capacidade. Também, o equipamento necessário para a frenagem regenerativa acabou revelando-se muito complexo e custoso. Assim, para o futuro, esta opção parece inteiramente descartada.

1.4 - Eletrificação com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Industrial.

Atribui-se ao engenheiro Kalman-Kando, da empresa húngara Ganz, o pioneirismo nas pesquisas da tração elétrica em frequência industrial [4]. Suas primeiras atividades datam de 1923, na Hungria. Neste país, em 1930, a linha Budapeste-Hegyeshalom foi eletrificada com 16 kV, 50 Hz e, já a partir de 1933, circularam neste trecho as primeiras locomotivas monofásicas. Nos dois primeiros tipos de locomotivas da experiência húngara (as locomotivas de Kando e as locomotivas Ganz) eram utilizadas máquinas assíncronas de indução como motor de tração. As locomotivas de Kando eram equipadas com um conversor síncrono de fases que alimentava o motor trifásico de rotor enrolado, e número variável de polos. Já as locomotivas Ganz, surgidas em 1950, além do conversor de fases, eram também equipadas com um conversor de

frequências. O fato de as locomotivas serem ambas mono-trifásicas deveu-se à dificuldade de utilização direta do motor monofásico a coletor em frequência industrial. Assim, optou-se por motores assíncronos trifásicos os quais são máquinas simples, robustas e requerem pouca manutenção. Em 1936, as ferrovias da Alemanha construiram uma linha experimental eletrificada com 20 kV, 50 Hz e 56 Km de extensão. Três modelos protótipos de locomotivas foram ensaiados nesta linha, antes da II Guerra Mundial. Havia locomotivas equipadas com motores assíncronos de indução, com motores de rotor duplo (motor Krupp) e com motores de corrente contínua controlados ou por válvulas de vapor de mercúrio ou através de autotransformadores. Em 1950, já após a guerra, também foi testada nesta linha uma locomotiva equipada com motores monofásicos a coletor.

A partir de 1948, as ferrovias francesas, sob a direção de Louis Armand, um grande entusiasta da tração em frequencia industrial, resolveram eletrificar com 20 kV, 50 Hz a linha experimental entre Aix-les-Bains e La Roche-Sur-Foron. Quatro modelos de locomotivas, dois com motores monofásicos a coletor e mais dois com motores de corrente contínua, foram encomendados. Os resultados desta experiência francesa foram discutidos, em outubro de 1951, nas Jornadas Técnicas de Informação, realizadas pela SNCF, em Annecy. Pouco depois, a magnitude de 25 kV, passou a ser, adotada como padrão de tensão da catenária para futuras eletrificações em corrente monofásica de frequência industrial.

A primeira linha a entrar em operação não experimental foi o trecho de 105 km entre Jadotville e Tenke. Esta linha, situada na República do Zaire (antigo Congo Belga) entrou em operação em 1952 e era eletrificada com 25 kV, 50 Hz. Para operação nesta linha (e nos 367 Km adicionais eletrificados nos anos futuros), a Companhia belga ACEC forneceu à Companhia do Caminho de Ferro do Baixo Congo ao Catanga quatro tipos de locomotivas. Dois tipos eram equipados com motores monofásicos a coletor e outros dois com motores de corrente contínua controlados à ignitrons ou válvulas de vapor de mercúrio.

Em 1952, a linha Valenciennes-Thionville, uma das linhas de maior tráfego na Europa, começou a ser eletrificada com 25 kV e 50 Hz. Também foram experimentados quatro protótipos de locomotivas com diferentes tipos de motores de tração.

Conforme mencionado no texto, a procura do tipo de motor de tração diretamente aplicável acabou exigindo, de todos os países interessados na implantação do sistema, exaustiva pesquisa experimental traduzida na encomenda de locomotivas de modelos diversos, cada modelo equipado com um tipo de motor de tração diferente ou ainda com um tipo diferente de controle para o mesmo tipo de motor. A tarefa de selecionar o motor mais adequado é surpreendentemente complexa porque envolve a consideração de uma multiplicidade de aspectos operacionais dos quais o tipo de corrente utilizada na catenária é apenas um destes muitos aspectos [5]. A partir de 1959, com o crescente emprego dos semicondutores de potência na tração elétrica, tornou-se possível simplificar o controle dos motores de tração, obtendo-se regulação contínua de tensão, máxima utilização da aderência e possibilidade de efetuar a frenagem elétrica com recuperação de energia [4]. No estágio atual da tração elétrica alimentada com corrente monofásica de frequência industrial, o motor mais empregado é o motor de corrente contínua com estator laminado, conhecido como motor de corrente ondulada. Quando a catenária é alimentada com corrente contínua, este motor funciona bem, alimentado por um "chopper" (o mais simplificado conversor operando com comutação forçada) e quando a alimentação é feita em corrente alternada, o funcionamento através de um retificador (o mais simplificado conversor de comutação natural) também é muito bom. Esta simplicidade no acionamento favorece o motor de corrente ondulada na disputa com outros motores [6]. Com o desenvolvimento dos inversores, passa a existir a possibilidade concreta de que máquinas assíncronas de indução possam vir a ser largamente empregadas na tração elétrica, em lugar dos motores de corrente contínua [7, 8]. Apesar da maior complexidade do sistema de conversores a estado sólido empregado no controle dos motores assíncronos, o uso destes motores, sob determinadas circunstâncias, pode assegurar uma solução melhor em termos de desempenho e do custo global da locomotiva [9].

Além dos países citados, outros países - Turquia, Portugal, União Soviética, Luxemburgo, Grã-Bretanha, Japão, Índia, República Popular da China, Paquistão, Bulgária, Romênia, Iugoslávia, Checoslováquia, Coréia do Sul e Finlândia - tem ferrovias eletrificadas com corrente monofásica de frequência industrial.

1.5 - A Eletrificação de Ferrovias Brasileiras com Corrente Alternada Monofásica de Frequência Industrial.

Ao contrário do que ocorreu com o resto do mundo, os equipamentos e a tecnologia empregados na eletrificação das ferrovias latino-americanas não foram fornecidos pelos países europeus. Excetuando-se a Costa Rica, cuja ferrovia foi eletrificada em 1929 com corrente alternada monofásica (15 kV e 20 Hz) pelos alemães, o restante da América Latina eletrificou suas ferrovias seguindo a experiência e a influência dos norte-americanos. Na América Latina, apenas o México, o Brasil e o Chile tem um sistema ferroviário eletrificado apreciável. Estes países tem praticamente todas as suas ferrovias eletrificadas com corrente contínua, principalmente ao nível de 3000 V [10]. Dentre estes três países, o Brasil é aquele que possui a maior malha ferroviária. Ainda que o Brasil seja um tradicional usuário de tração elétrica alimentada com corrente contínua, as administrações de nossas ferrovias nem sempre deixam de considerar que o desenvolvimento tecnológico atual da tração elétrica recomenda a eletrificação das catenárias com corrente alternada monofásica. Ao que pese existir, neste país, uma prioridade apenas secundária para o transporte ferroviário, sempre surge a necessidade de estabelecer novas linhas. Alguns exemplos, citados a seguir, vem mostrar que já existem sinais de modernização de nossas ferrovias. Dos poucos projetos, alguns já consideram a eletrificação com corrente alternada monofásica, como não poderia deixar de ser, porque esta é a tendência manifestada mundialmente.

A primeira experiência de que se tem notícia de eletrificação de uma ferrovia brasileira com tensão não contínua refere-se à Ferrovia do Aço, da Rede Ferroviária Federal (RFFSA). Esta ferrovia, ligando as localidades de Jaceaba e Saudade, terá os seus 296 Km de extensão eletrificados com corrente alternada monofásica ao nível de 25 kV e 60 Hz. O projeto desta ferrovia, assinado em 1976 com a GEC Transportation Projects Ltd, prevê inclusive a especificação do material. O equipamento de linha aérea será projetado e fornecido pela Balfour Beatty Power Construction Co Ltd, sob supervisão da GEC, conforme previsto no contrato. Trinta e cinco locomotivas de 3500 kW, controladas a tiristores, serão construídas no Brasil, pela Equipamentos Villares, segundo projeto fornecido pela GEC. O equipamento de sinalização será fornecido pela GEC-General Signal Ltd.

A catenária deverá ser alimentada a partir de 11 subestações localizadas a cada 30 ou 35 Km. Cada subestação deverá estar equipada com dois trasformadores de 32 MVA conectados, pelo seu lado de alta tensão, a uma linha de 138 kV construída e operada pela própria RFFSA, em razão da precaridade da rede pública nacional existente naquela região.

A previsão, à época da assinatura dos contratos, era ter locomotivas operando na Ferrovia do Aço por volta de fins de 1983 [11]. No entanto, em razão de dificuldades de ordem econômico-financeira no país, sabe-se que o projeto teve que sofrer cortes e acumular atrasos.

Uma outra experiência de eletrificação ferroviária, com corrente alternada monofásica à 60 Hz, cogitada no Brasil refere-se à Estrada de Ferro Ponta da Madeira-Carajás, cujos projeto básico de eletrificação foi divulgado pelo Grupo PTEL-ELECTRA, em 1980. Desde abril de 1975 este Grupo vinha tratando de selecionar o esquema básico de eletrificação e definir as características de carga da linha [12]. Esta ferrovia, com cerca de 900 Km de extensão, servirá para o transporte de grande quantidade de minério da Mina de Carajás para um porto situado em Ponta da Madeira, próximo de São Luiz. A mina, a ferrovia e o porto fazem parte do grande projeto de exportação de minérios

denominado Projeto Carajás. O nível de tensão na catenária, embora inicialmente fixado em 25 kV, foi alterado para 50 kV. As subestações abaixadoras, cujo número de unidades depende da definição deste nível de tensão, serão alimentadas em 230 kV pelas subestações de 500 kV-230 kV da CHESF, em Miranda e em Imperatriz e pela subestação de Marabá da ELETRONORTE.

Atualmente as obras não estão caminhando conforme planejado em razão inclusive da ocorrência de um refluxo no mercado mundial de minérios, cuja exportação constitui a razão do projeto.

Como último exemplo, pode-se citar o plano de eletrificação do trecho Barra Mansa-Manoel Feio da RFFSA. Em 1974 a HIDROSERVICE ganhou a concorrência para elaborar o projeto de eletrificação do trecho mencionado e subcontratou a firma inglesa de consultoria Kennedy and Donkin. O relatório final da HIDROSERVICE foi divulgado em 1976 [13]. É inútil avançar em outras considerações porque o projeto jamais foi executado. Mas é importante citar que no projeto decidiu-se pela eletrificação do trecho com corrente alternada monofásica de frequência industrial (25 kV e 60 Hz). Como a malha ferroviária em que está inserida esta nova ferrovia está eletrificada com corrente contínua (3000 V), o projeto previa a aquisição inicial de 7 locomotivas bi-correntes, além de 35 unidades controladas a tiristores.

Ainda que, por uma série de razões, nenhum dos três exemplos citados possa corresponder a ferrovias reais em plena operação, é razoável concluir que a eletrificação com corrente alternada monofásica certamente desempenhará um papel de destaque no futuro, quando o país tiver superado suas dificuldades e puder modernizar suas ferrovias.

1.6 - Conclusões

Embora seja possível detetar alguma discussão

acerca do melhor motor a ser empregado nas locomotivas modernas, é imediato constatar que não existem dúvidas acerca da eletrificação das catenárias: deve ser feita com corrente alternada monofásica em alta tensão e em frequência industrial. A razão da marcante preferência por esta forma de eletrificação, a qual se desenvolve e se espalha pelo mundo, só pode ser encontrada na sua superioridade técnica e econômica. Como a linha de contato opera em alta tensão e na mesma frequência da rede nacional que a alimenta, as subestações resultaram muito mais simples do que aquelas utilizadas nas alternativas anteriores. Existe agora uma facilidade muito maior de alimentar as subestações, ficando, muitas vezes, dispensado o uso de linhas especiais para este fim. A linha de contato é mais leve e mais barata. Portanto, em termos de instalações fixas, foi possível atingir um dos objetivos principais da eletrificação monofásica de frequência industrial: reduzir custos de instalações permanentes.

Mesmo em nosso país, não fossem as circustâncias adversas, pelo menos três ferrovias já deveriam ter sido eletrificadas com esta alternativa. A presença maciça da eletrificação em 3000 V não representa hoje nenhum obstáculo à modernização. Na Europa, a existência de diversos sistemas de eletrificação foi resolvida pelas administrações ferroviárias através da aquisição de locomotivas capazes de operar em mais de um sistema. Assim, existem locomotivas bi-tensões (1500 e 3000 V), bi-frequência (15 kV, 16 2/3 Hz e 25 kV, 50 Hz), bi-corrente (1500 V e 25 kV, 50 Hz) e ainda tri e quadri-correntes.

Na linha Barra Mansa-Manoel Feio deveriam operar locomotivas bi-corrente (3000 V e 25 kV, 60 Hz) para permitir o acesso direto à malha de 3000 V.

O nível de tensão de 25 kV tem sido o mais adotado na eletrificação monofásica ao redor do mundo. No entanto, nas ferrovias destinadas ao transporte de minérios, tem sido recomendado o nível de 50 kV. Atualmente já operam com esta tensão uma linha no Arizona e outra na África do Sul. No Brasil, a linha de Carajás também deverá operar com 50 kV.

Adotando-se 50 kV (em vez de 25 kV) consegue-se corrente menor na linha de contato e, em consequência, menor efeito de interferência indutiva sobre os circuitos de comunicação. Por outro lado, como existirá um número menor de pontos de alimentação, esta opção é menos favorável, sob o ponto de vista do desequilíbrio do sistema trifásico de alimentação das subestações.

Recentemente surgiram evidências acerca da retomada das obras da Ferrovia do Aço, no trecho ligando o município de Volta Redonda, no Rio de Janeiro, ao município de Jaceaba, em Minas Gerais [14]. Fala-se em concluir a obra em 18 meses.

CAPÍTULO II

O SISTEMA DE TRAÇÃO COM ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA

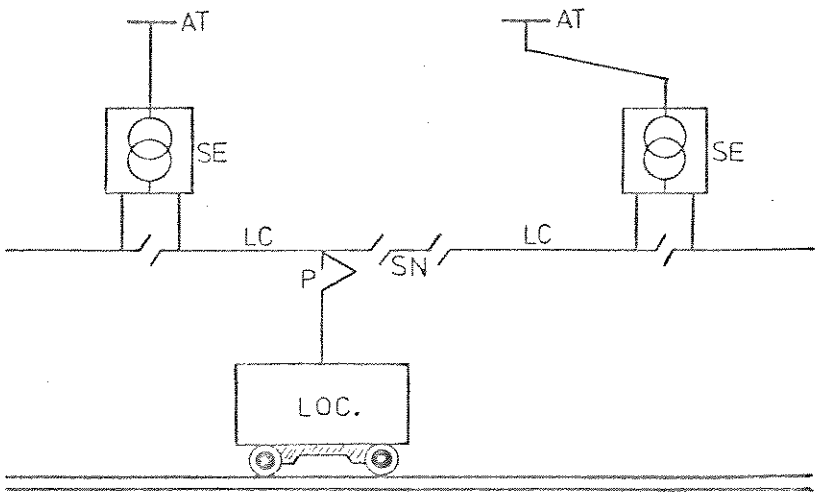
No capítulo anterior apontou-se a existência de, basicamente, três modalidades de sistemas de alimentação para tração elétrica. O presente capítulo é dedicado ao sistema com alimentação monofásica cuja catenária opera em alta tensão e frequência industrial.

2.1 - Apresentação do Sistema

A figura 2.1 abaixo permite visualizar os aspectos essenciais do sistema de tração elétrica com alimentação monofásica.

Usualmente, os barramentos AT de alta tensão que alimentam as subestações SE distribuídas ao longo da ferrovia são conectados diretamente à rede trifásica de frequência industrial já disseminada pelo país. Quando ocorre de a área ser desprovida desta rede, as subestações terão de ser alimentadas através de uma linha de transmissão especial. Nos projetos das futuras ferrovias brasileiras com alimentação monofásica estes barramentos deverão operar em 138 kV (Ferrovia do Aço) e 230 kV (Ferrovia de Carajás). Para a Ferrovia do Aço será necessário construir uma linha de transmissão para alimentar as subestações de tração, conforme descrito nos projetos. As linhas de contato LC também operam em alta tensão e o nível de tensão mais utilizado nas ferrovias existentes nas diversas partes do mundo é 25 kV. Algumas ferrovias especiais operam com 50 kV na catenária.

As subestações fazem a adequação dos níveis de tensão do barramento AT e da catenária LC.

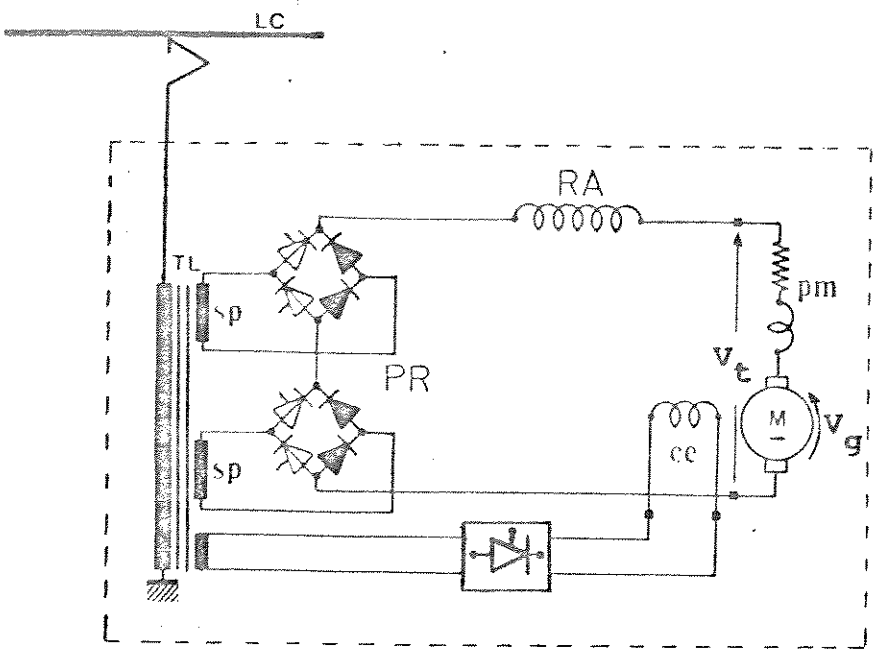


AT: Barramento de alta tensão
SE: Subestação de tração
LC: Linha de contato
SN: Secção neutra
P: Pantógrafo

Figura 2.1: Esquema básico do sistema de tração

As magnitudes de tensão mais adequadas para a operação da catenária e para a aplicação aos motores de tração não são diretamente compatíveis em razão de limitações inerentes ao projeto destes motores. Como os motores operam com tensão bem mais baixa do que a tensão da catenária, as locomotivas são equipadas com um transformador abaixador. Nesta modalidade de tração elétrica são utilizados motores de corrente contínua com excitação independente. Assim, a tensão da catenária, após adequação de nível é aplicada às pontes retificadoras existentes na locomotiva, as quais fornecem a tensão que é aplicada aos motores. A figura 2.2 apresenta um esquema de uma locomotiva típica deste tipo de tração. Os circuitos de excitação dos motores são

alimentados através de enrolamentos secundários auxiliares do transformador TL da locomotiva.



TL: Transformador da locomotiva
sp: Seçundário de potência
ce: Circuito de excitação
PR: Ponte Retificadora
RA: Reator de alisamento
pm: Parâmetros do motor

Figura 2.2: Esquema básico da locomotiva

O controle da tensão aplicada aos motores apresenta algumas variações. Na maioria das locomotivas acionadas através de comandos a tiristores, o controle é feito por meio de pontes retificadoras semi-controladas do tipo assimétrico, conforme apresentado na figura 2.3(a). Esta ponte recebe do transformador tensão fixa já abaixada e fornece tensão contínua cujo nível é controlado através dos ângulos de gatilhamento dos tiristores. Muitas locomotivas de geração anterior operam com pontes de diodos (figura 2.3(b)) e seu transformador possui um dispositivo para mudança do número de espiras o qual permite aplicar tensão alternada variável a estas pontes não controladas. É interessante fazer algumas considerações a respeito da substi-

tuição que se verificou deste último esquema de controle pelo uso de pontes a tiristores. O dispositivo para mudança do número de espiras ("tap-changer"), além de requerer manutenção criteriosa, tem um tempo de resposta para a sua atuação o qual limita a ação do controle em caso de patinagem. É preciso ainda mencionar que a corrente varia aos saltos a cada mudança e que isto se reflete no torque, podendo causar patinagem, mesmo quando o limite de aderência não é excedido. Nas locomotivas modernas este dispositivo foi substituido pelo uso de pontes controladas a tiristores. Como os tiristores permitem um controle muito refinado, o problema de saltos na corrente praticamente desapareceu e a operação mais próxima do limite de aderência tornou-se viável. Os tiristores tem um tempo de resposta muito curto, permitindo pronta ação, caso ocorra a perda de aderência. A eliminação do mencionado dispositivo permitiu ainda reduzir o peso do equipamento a bordo da locomotiva.

Normalmente as locomotivas com alimentação monofásica operam com esquema de frenagem reostática. Existem, no entanto, locomotivas equipadas com pontes retificadoras controladas em que é possível ocorrer a frenagem regenerativa [15], conforme apresentado na figura 2.3(c). As pontes semi-controladas tem suas vantagens, mas não permitem a operação de frenagem no modo regenerativo.

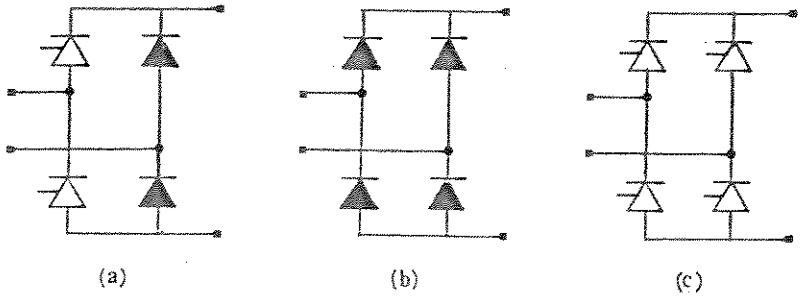


Figura 2.3: Tipos de pontes retificadoras

O consumo acentuado de potência reativa e a possibilidade de que os harmônicos de corrente produzidos venham interfirir eletromagneticamente no sistema de sinalização e nos circuitos de comunicação colocados ao lado da via são aspectos que costumam ser computados como desvantagens da tração com alimentação monofásica. O uso de pontes retificadoras compostas de mais de uma unidade ligadas em cascata reduz a magnitude destes harmônicos e melhora o fator de potência da instalação [16].

A figura 2.4 representa uma ponte retificadora PR constituida de duas unidades retificadoras P_1 e P_2 conectadas em cascata.

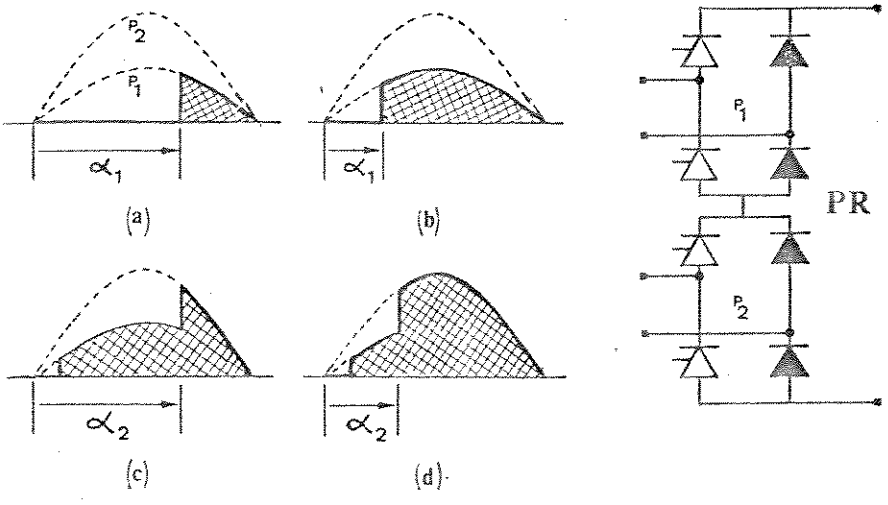


Figura 2.4: Operação sequencial das pontes

As duas unidades operam em sequência, cada uma podendo desenvolver até metade da tensão que a ponte toda pode produzir. Na figura 2.4(a), apenas a unidade retificadora P_1 está em operação com um ângulo α_1 de gatilhamento bastante recuado. Neste caso, o qual corresponde ao início do processo de aceleração do motor, a tensão desenvolvida pela ponte PR é pequena.

Na figura 2.4(b), o ângulo de gatilhamento da unidade P_1 já é bem menor. A tensão desenvolvida é maior mas a unidade P_2 ainda não entrou em operação. A figura 2.4(c) apresenta a situação em que a ponte P_2 já opera com ângulo α_2 de gatilhamento. Neste caso, a unidade P_1 opera com ângulo α_1 mínimo fixado e a ponte PR já desenvolve mais da metade da tensão que pode produzir. Finalmente, a figura 2.4(d) apresenta a situação em que o ângulo α_2 da unidade P_2 já se aproxima de seu valor mínimo. O ângulo α_1 continua fixo e a ponte PR desenvolve uma tensão próxima da tensão máxima. O motor opera com tensão aplicada próxima de seu valor nominal em que o motor atinge sua velocidade máxima com campo pleno (velocidade base). Sempre que a unidade P_2 entra em operação, a unidade P_1 deve estar operando com um ângulo de gatilhamento α_1 mínimo usualmente não nulo. Ângulos de gatilhamento menores do que este mínimo implicam no risco de que o tiristor não dispare por causa do intervalo de sobreposição deste tiristor com o diodo. É necessário observar que as pontes retificadoras da locomotiva são constituidas de tiristores conectados em paralelo, em razão da intensidade da corrente exigida pelos motores. É difícil assegurar-se de que todos os tiristores tenham precisamente as mesmas características. Assim, quando se opera com ângulo de gatilhamento muito pequeno, existe sempre o risco de que alguns tiristores da ponte comecem a conduzir enquanto outros ainda não tenham alcançado as condições que o permitam fazê-lo. Se este fato vier a se dar, a ponte retificadora pode ficar danificada [17]. Por outro lado, o ângulo α_1 da unidade P_1 que dispara primeiro, não deve ser recuado além de um certo valor máximo a partir do qual a corrente do motor deixe de circular continuamente. Descontinuidades na corrente do motor produzem variações bruscas no torque que podem acarretar o aparecimento de patinagem. As observações feitas se aplicam também à outra unidade retificadora. Embora nem sempre seja possível afirmar que medidas adotadas com o objetivo de reduzir as magnitudes das componentes harmônicas da corrente possam produzir também melhoria do fator de potência, é forçoso reconhecer que o emprego de pontes retificadoras compostas de unidades que operam em sequência alimentando motores de tração com excitação independente (em vez de motores com excitação série) constitui uma condição muito favorável a qual resulta em menor consumo de po-

tência reativa, melhor fator de potência e considerável redução da interferência eletromagnética em circuitos próximos da via [18,19]. Por esta razão, no atual estágio de desenvolvimento da tração com alimentação monofásica do tipo considerado, as locomotivas controladas a tiristores tem suas pontes retificadoras compostas de diversas unidades operando em sequência e não são utilizados preferencialmente os motores com excitação série, como ocorre em outras modalidades de tração elétrica.

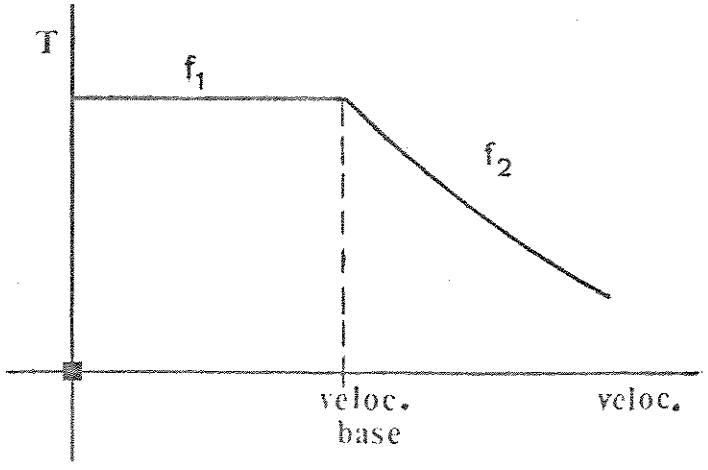
Quanto à interferência eletromagnética, determinados tipos de arranjos de catenária e do condutor de retorno, associados ou não ao emprego de transformadores ("booster transformers"), podem apresentar bons resultados [20].

Tenciona-se, ao longo deste trabalho, considerar apenas os casos em que a ponte retificadora é comandada através do ângulo de fase. Mas a ponte pode ainda ser comandada por setores; neste caso, em vez de ocorrer a comutação natural, típica do comando pelo ângulo de fase, será necessário utilizar algum esquema de comutação forçada. O comando por setores é recomendado para os casos em que seja imprescindível a operação com um fator de potência que não se pode conseguir, a menor custo, com um esquema de controle pelo ângulo de fase. Embora permita controlar o fator de potência, o comando por setores é menos favorável quanto ao problema de geração de harmônicos. A maior complexidade do circuito de comando, devida à necessidade de comutação forçada, parece que não trará maiores problemas se forem utilizados tiristores do tipo GTO [21].

2.2 - Funcionamento da Locomotiva

A figura 2.5 representa a curva característica torque (T) versus velocidade de rotação do motor e indica como se processa a aceleração da locomotiva.

Em uma primeira fase f_1 , estando os motores com excitação plena, seleciona-se a corrente nominal do motor cuja intensidade será mantida constante durante o processo de aceleração. Durante esta fase, os ângulos de gatilhamento dos tiristores estão variando na medida em que seja propiciado o desenvolvimento da tensão necessária a cada instante de modo que a aceleração se faça sob condições de torque constante. Como a força contra-eletromotriz do motor varia continuamente à medida em que o motor vai acelerando, se os ângulos não variarem em correspondência não será possível fazer a aceleração sob as condições desejadas. Esta fase vai terminar quando o motor tiver alcançado a sua velocidade base, condição em que a tensão aplicada ao motor é a tensão nominal. Em uma segunda fase f_2 , o motor pode ganhar mais velocidade através de enfraquecimento de seu campo de excitação e às custas de redução de torque. Durante esta fase o motor opera com potência nominal e os ângulos de gatilhamento permanecem invariáveis, fixados nos valores que produzem tensão nominal. A característica na figura 2.5 corresponde à curva envoltória para as condições limitantes da operação. Nada impede, no entanto, que seja selecionado um valor de corrente menor do que o valor nominal.



f_1 : Aceleração sob condições de torque constante
f_2 : Aceleração sob condições de potência constante

Figura 2.5: Aceleração da locomotiva

A corrente que circula pelo motor provém da ponte retificadora a qual fornece corrente ondulada. A ondulação da corrente pode acarretar alguns problemas para o funcionamento do motor. Então torna-se necessário tomar medidas para atenuar estas oscilações. A solução é utilizar um reator para promover esta atenuação. É necessário no entanto considerar que a atenuação das oscilações tem de ser feita com critério porque se as ondulações forem atenuadas além do razoável, a corrente no primário do transformador passará a conter harmônicos indesejáveis. Então, a dose de atenuação deve representar uma solução de compromisso que concilie estas duas tendências opostas.

Resultados experimentais recomendam trabalhar com uma relação de atenução entre 20 e 30% [22,23] nos reatores de alisamento.

Considerando-se que a magnitude do reator de alisamento muito pouco afeta os picos de tensão que podem aparecer no pantógrafo da locomotiva [24], nas considerações feitas a seguir a corrente do motor será assumida constante, sem oscilações, para o tipo de locomotiva em questão.

Embora a sequência de operação de cada unidade da ponte retificadora e as diversas configurações correspondentes aos diversos modos de trabalho sejam conhecidos [25], é necessário fazer algumas observações específicas. A figura 2.6 mostra o efeito da operação de uma ponte retificadora simples sobre a forma de onda simplificada da corrente i_L , da linha de contato LC.

O efeito do gatilhamento dos tiristores T_1 e T_2 está indicado na forma de onda da corrente. No instante t_1 ocorre o gatilhamento do tiristor T_1 ; antes deste instante, existe um intervalo de tempo (indicado por cd na figura 2.6) em que não circula corrente pela linha de contato. Neste intervalo, a corrente I_m do motor circula livremente pelos diodos D_1 e D_2 , sem circular pelos tiristores ou pelo secundário do transformador. Esta trajetória em circulação livre pelos diodos é uma característica intríseca muito interessante das pontes semi-con-

troladas do tipo assimétrico. O intervalo de circulação livre está sempre presente na primeira fase f_1 de aceleração da locomotiva, quando o ângulo de condução dos tiristores ainda não é pleno. É interessante observar que, mesmo no fim da fase f_1 , o intervalo cd termina em $t=t_1$ mas começa depois de $t=t_o$ (o instante de cruzamento de zero da tensão). Depois de $t=t_o$, mas antes do início do intervalo cd, a corrente I_m circula pelo diodo D_2 (o qual começou conduzir em $t=t_o$), pelo diodo D_1 e pelo tiristor T_2 (que ao início do intervalo cd já não mais estará conduzindo). No intervalo de tempo que se segue ao cruzamento de zero da tensão, três elementos estarão conduzindo: o diodo D_2 (assumindo gradativamente a corrente I_m), o tiristor T_2 (deixando, da mesma forma, de conduzir esta corrente) e o diodo D_1 (que já conduzia, e continuará conduzindo, a corrente I_m). Neste intervalo vai ocorrer a comutação natural do tiristor T_2 . O instante $t=t_2$ deve ser posterior ao fim deste período de comutação, caso contrário não será possível gatilhar o tiristor T_1 , por falta da polarização necessária. Se o instante $t=t_1$ coincidir exatamente com o instante em que termina o período de comutação do tiristor T_2 , não haverá o intervalo cd de circulação livre. Mas isto implica, no entanto, na necessidade de que o fim do período de comutação seja detetado com precisão. A menos deste caso, haverá sempre um intervalo de circulação livre. Seguindo-se ao instante t_1 existe um outro intervalo de tempo em que estão conduzindo, o tiristor T_1 (que acaba de ser gatilhado e assume gradativamente a corrente I_m), o diodo D_1 (que está saindo, da mesma forma) e o diodo D_2 (que já conduzia, e continuará conduzindo, a corrente I_m). No segundo semi-ciclo da tensão existem outros dois intervalos de comutação em que tudo ocorre de forma análoga.

A figura 2.7 apresenta a mesma situação, para o caso em que uma ponte dupla está em operação.

Nesta figura, como as duas unidades retificadoras estão em operação, então a unidade que começou a operar em primeiro lugar já está com seu ângulo de disparo no valor mínimo. Não obstante, admite-se a presença de intervalos de circulação livre, conforme examinado anteriormente.

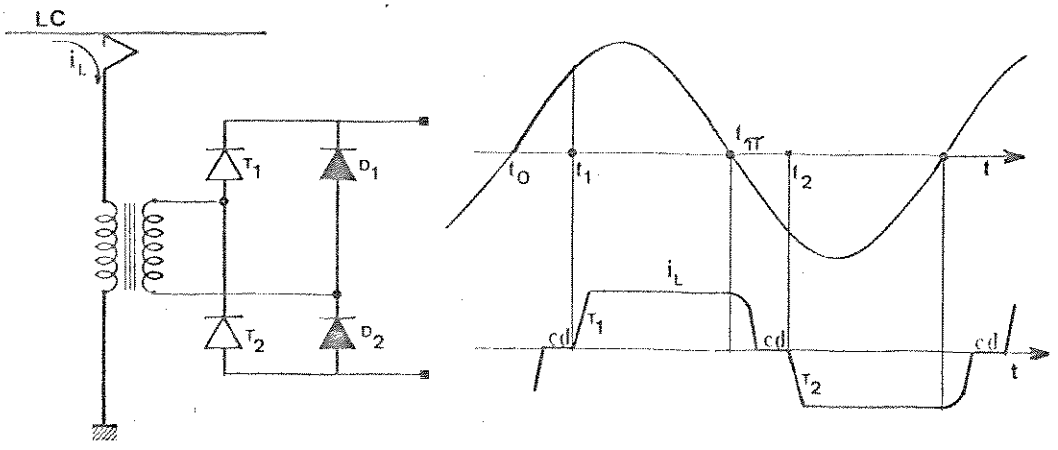


Figura 2.6: Operação da ponte retificadora simples.

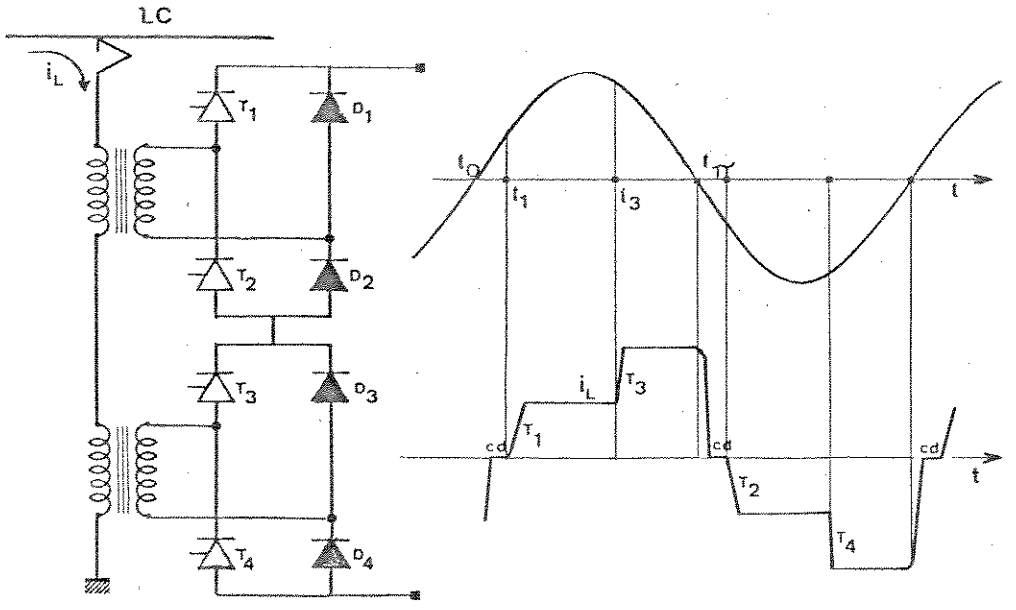


Figura 2.7: Operação da ponte retificadora dupla.

2.3 - Outras Considerações

As figuras apresentadas neste capítulo pretendem simplesmente dar uma visão esquemática do sistema de tração, cuja constituição, dinâmica de operação e conexão com a rede nacional de alimentação são na realidade bastante mais complexas do que as figuras parecem sugerir. O material apresentado está, no entanto, dosado de modo a realçar os aspectos a serem desenvolvidos ao longo do trabalho e a permitir uma razoável compreenção desta modalidade de tração. Assim, nas formas de onda de corrente apresentadas nas figuras 2.6 e 2.7, por exemplo, não estão sendo considerados os efeitos de ressonância que podem introduzir modificações importantes nas mesmas. Esta influência será examinada em outro capítulo.

Em virtude de chaveamento dos tiristores, especificamente durante a fase f_1 de aceleração da locomotiva, diversas partes o sistema sofrerão consequências. Os próprios semicondutores das pontes retificadoras podem ficar sujeitos a efeitos transitórios. Na linha de contato podem aparecer sobretensões perigosas e, mesmo a rede primária de alimentação, pode vir a ser afetada pela presença de harmônicos desenvolvidos durante o chaveamento. Dentre estes problemas, o presente trabalho está dedicado exclusivamente ao exame de sobretensões na linha de contato, durante a primeira fase de aceleração da locomotiva.

CAPÍTULO III

SOBRETENSÕES NA LINHA DE ALIMENTAÇÃO

3.1 - A Característica da Tração Elétrica como Carga

Conforme observado no capítulo anterior, a locomotiva representa, para o sistema que a alimenta, uma carga que absorve corrente distorcida em sua forma de onda, a qual, embora periódica e simétrica, não é senoidal. Esta corrente, ao circular pelo sistema de alimentação, vai ocasionar distorções também na tensão. Uma das possíveis consequências destas distorções pode ser o aparecimento de sobretensões na linha de alimentação da locomotiva. Mas a própria rede primária que alimenta as subestações pode sofrer consequências porque a corrente distorcida, ao circular pela rede, produz distorções inclusive na tensão primária, afetando outros consumidores [26].

Sob o ponto de vista da análise matemática, uma corrente que apresente distorções em sua forma de onda pode ser entendida como uma composição de correntes de frequências harmônicas. Assim, cada harmônico de corrente, ao circular pelo sistema, dá origem a um harmônico correspondente de tensão, o qual é precisamente a queda de tensão na impedância do sistema, devida à circulação deste harmônico de corrente. Porisso, as distorções que ocorrem na forma de onda da tensão são sempre entendidas como um fenômeno que tem origem harmônica.

O que é realmente fundamental é que a origem das distorções na forma de onda da corrente está, em última análise, no conversor (isto é, na ponte retificadora) e, mais precisamen-

te, no processo de comutação dos tiristores. As distorções na forma de onda da tensão vão depender das características das impedâncias pelas quais esta corrente vai circular [27].

3.2 - A Origem das Sobretensões na Linha de Contato

Observa-se, nas figuras 2.6 e 2.7, que a corrente da linha de contato, a qual não é senoidal, apresenta derivada positiva muito acentuada no instante em que ocorre o gatilhamento de um tiristor. Isto significa que esta corrente experimenta uma subida muito rápida neste instante. Por outro lado, é fato já bem conhecido, que a capacitância que a linha possui, distribuida ao longo de seu comprimento, e a indutância de dispersão do transformador da subestação constituem um circuito ressonante. O aparecimento de sobretensões na linha de contato é atribuido ao fato de que a rápida subida na corrente pode excitar a ressonância deste circuito. Quanto mais acentuada a subida da corrente maiores são as chances de que esta corrente contenha componentes harmônicas de frequências que coincidam, ou mesmo que se aproximem, da frequência natural de oscilação do circuito ressonante. Havendo oscilação, ainda que parcial, as componentes harmônicas da corrente, cujas frequências são mais próximas da frequência de ressonância, serão amplificadas. As quedas de tensão, devidas à circulação destas componentes de corrente pela linha de contato, podem significar sobretensões de consequências bastantes graves. Tensões de altas frequências podem ser geradas e, como consequência, os valores de crista da tensão da linha podem vir a apresentar picos de magnitudes excessivas. Sob determinadas circunstâncias, a presença de sobretensões pode significar que o sistema está sujeito ao risco de danos sérios em suas diversas partes, principalmente na locomotiva, e especialmente nos semicondutores da ponte retificadora. A presença de mais de uma locomotiva acionando a mesma composição constitui uma situação bastante preocupante, com relação à possibilidade de ocorrência de sobretensões, sobretudo se houver coincidência

de instante de gatilhamento dos tiristores de ambas. Sabe-se também que o problema é mais crítico para a linha que opera com tensão mais elevada (50 kV) do que para aquela que opera com os 25 kV usuais [28].

É interessante mencionar que o aparecimento de picos de tensão tendendo a acentuar a crista da tensão de alimentação sempre tem lugar durante a fase f_1 de aceleração da locomotiva, quando os tiristores conduzem apenas parcialmente. Não se trata e picos eventuais de tensão. Ao contrário, como os tiristores permanecem conduzindo parcialmente durante os diversos minutos que a aceleração da locomotiva pode demorar, a tensão na linha poderá ficar continuamente excessiva durante este tempo. Como este é um fenômeno que se verifica durante um considerável período de tempo, as sobretensões associadas costumam ser denominadas sobretensões contínuas [24].

A figura 3.1 apresenta um esquema bem mais realista para a forma de onda da corrente na linha de alimentação, para o caso do funcionamento de uma locomotiva equipada com uma ponte dupla, isto é, uma ponte composta de duas unidades retificadoras operando em cascata.

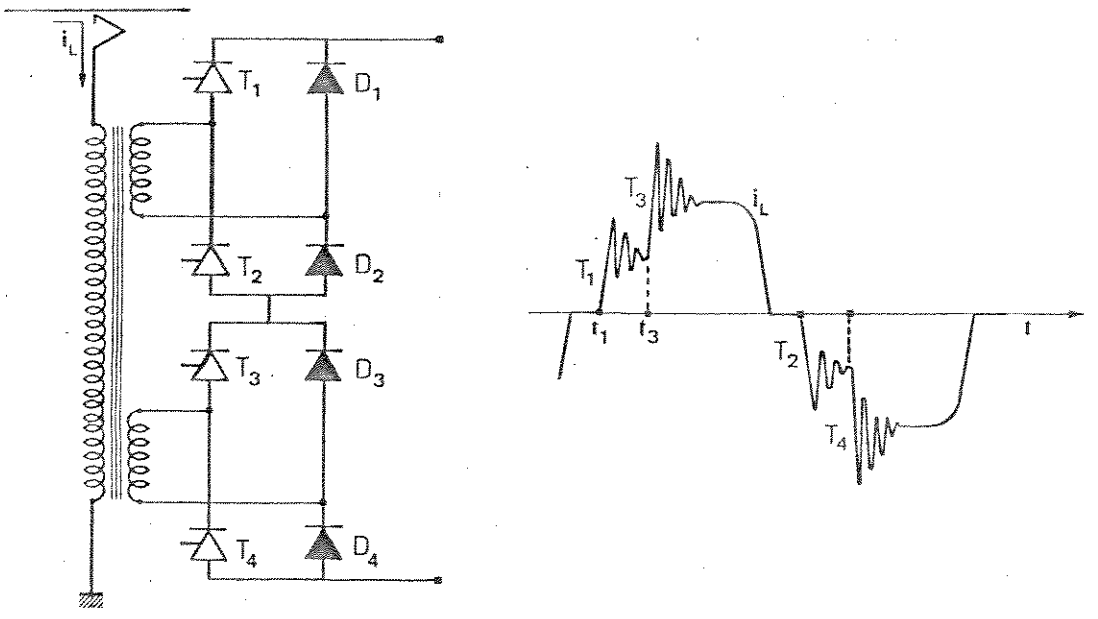


Figura 3.1 - Forma da corrente na linha de alimentação.

A representação da corrente apresentada na figura 3.1 é simplesmente uma reprodução esquemática. Mas a corrente que realmente circula pela linha de contato tem essencialmente esta forma de onda, conforme se pode constatar observando-se o oscilograma da corrente na linha de contato no simulador construido para a abordagem do problema pela via analógica [29]. Os detalhes deste simulador serão discutidos no capítulo VI.

Quando o tiristor T_1 é gatilhado em $t=t_1$, a subida rápida da corrente excita a ressonância do circuito provocando o aparecimento da oscilação mostrada na figura. Neste exemplo a oscilação tem uma razoável dose de amortecimento, mas o comportamento do sistema depende muito do fator de atenuação que o mesmo vier a apresentar. É claro que esta oscilação da corrente repercurte imediatamente na tensão, que passa a apresentar picos excessivos, dependendo da característica da impedância naquela frequência. Em $t=t_3$ ocorre o gatilhamento do tiristor T_3 e, em consequência disto, a oscilação, que já vinha experimentando um bom amortecimento, se reinicia com maior intensidade devido à magnitude mais elevada da tensão. A subida da corrente é mais rápida e os picos na tensão da linha de contato podem ter maior magnitude. No semi-ciclo negativo o problema se repete depois do gatilhamento dos tiristores T_2 e T_4, conforme representado na figura 3.1.

Sempre que o conteudo hamônico da corrente de uma determinada carga puder ser avaliado de antemão, as distorções que aparecem na tensão poderão ser previstas, desde que a impedâcia do circuito seja conhecida no ponto de interesse. Deve-se sempre estar atento para a possibilidade da ocorrência de ressonância.

3.3 - Cálculo de Sobretensão na Linha de Alimentação

Ainda a nível de projeto do sistema de alimentação da locomotiva, torna-se necessário fazer algum tipo de avaliação

visando ter um conhecimento prévio das características da tensão que deverá se desenvolver na linha de contato durante, e como consequência, do processo de aceleração da locomotiva. Então será possível prever se a linha de contato poderá estar sujeita a sobretensões. Assim já se pode antecipar para a fase de projeto a extensão do fenômeno e suas possíveis consequências a fim de que providências adequadas já possam ter sido tomadas quando a ferrovia entrar em operação. A tendência que vem se firmando de eletrificar algumas linhas com 50 kV torna esta providência mais imperiosa. Esta avaliação tanto pode ser realizada através de computação digital quanto pode também ser feita através de simulação analógica. Cada um destes dois enfoques apresenta suas limitações e, porisso, é interessante fazer uso de ambos nas investigações. Resultados de análise digital ou de simulação analógia podem ser confrontados com medições realizadas no próprio sistema, quando este entrar em operação.

3.3.1 - A Avaliação Digital da Tensão

Uma forma conhecida de tratamento do problema através da via digital consiste em considerar a locomotiva como uma fonte de harmônicos de corrente. Assim, a forma de onda da corrente da locomotiva é desenvolvida em suas componentes harmônicas, computadas tanto em magnitude quanto em fase. A seguir, injeta-se no sistema de alimentação cada uma das componentes da corrente, obtendo-se a correspondente componente harmônica de tensão como resposta. Finalmente, sobrepondo-se à fundamental a soma dos resultados obtidos para cada frequência, obtém-se a forma de onda da tensão na linha em função do tempo, após a aplicação da transformada inversa de Fourier. É evidente que a precisão dos resultados obtidos vai depender do nível de detalhamento da representação do sistema utilizada nos cálculos. Existem dificuldades em se conseguir uma boa representação do sistema para as diferentes frequências em que este opera, durante o processo transitório que resulta do funcionamento das pontes retificadoras. A trajetória de retorno da corrente da linha de contato, envolvendo a circulação de corrente pelos trilhos,

pela terra e pelo condutor de retorno, torna complexa a sua representação, principalmente se estiverem sendo utilizados transformadores ("booster transformers") [30]. É necessário ainda considerar que alguns parâmetros do sistema apresentam apreciáveis variações com a frequência de operação, enquanto outros tem influência decisiva sôbre a frequência de ressonância do sistema. Como, felizmente, nem todos os parâmetro do sistema influem de forma determinante no desenvolvimento de sobretensões, é possível conseguir uma representação razoável, embora simplificada, para uso no cálculo de tensões. Além dos cuidados exigidos na representação do sistema, esta forma de cálculo digital apresenta algumas dificuldades:

- Um primeiro inconveniente reside na necessidade de que a forma de onda da corrente da locomotiva seja conhecida. Acontece, no entanto, que esta forma de onda não apenas é função dos ângulos de gatilhamento dos tiristores, como também é função do posicionamento da locomotiva no trecho de linha. Resulta que é necessário calcular o conteúdo de harmônicos da corrente para cada valor de ângulo de gatilhamento e para cada posição ocupada pela locomotiva no trecho. Ainda que o fabricante forneça os dados acerca da corrente da locomotiva, o volume de resultados obtidos nos cálculos é muito grande. Mesmo a análise apenas dos casos mais críticos pode ficar dificultada porque inclusive não é fácil identificá-los no universo de resultados obtidos da análise realizada.

- Uma segunda dificuldade refere-se ao fato de que, nesta análise, primeiro é calculado o conteudo de hamônicos da corrente e depois, em uma segunda fase, a corrente é injetada no sistema. Com isto, a interação entre a locomotiva e o sistema que a alimenta não é levada em conta.

Estes fatos indicam a necessidade de confrontar os resultados da análise digital com as medições realizadas no próprio sistema e com resultados observados na simulação analógica.

O tratamento pela via da simulação analógica consiste em implementar um modelo em escala reduzida para o sistema de tração, incluindo a locomotiva. Através deste modelo, é possível observar diretamente (através de um osciloscópio) as características da forma de onda da tensão, em qualquer parte do sistema, resultantes de variações no ângulo de gatilhamento ou de modificações na posição da locomotiva. Assim, as circunstâncias que produzem os casos mais críticos, em termos de sobretensões, podem ser avaliadas. Além disso, as relações existentes entre o problema de sobretensão e as magnitudes dos parâmetros do sistema podem ser levantadas através de variação destes mesmos parâmetros no modelo.

A implementação de um modelo analógico que produza uma boa representação do sistema de tração não é tarefa fácil de ser cumprida. Existem parâmetros cuja variação com a frequência precisa ser corretamente representada no modelo para que este apresente a mesma característica de atenuação que o sistema de tração apresenta nas diversas frequências. Caso contrário, o problema de sobretensões pode parecer mais sério, ou mais brando, do que é na realidade [31]. A linha de alimentação, cujos parâmetros e perdas são distribuídos ao longo do comprimento do trecho, pode ser representada no modelo através de um determinado número de secções " T " . É necessário observar cuidadosamente que o número de secções precisa ser escolhido de modo que resulte uma boa representação do sistema na frequência de ressonância.

Existem ainda problemas decorrentes do baixo nível de tensão utilizado nos modelos e que podem criar situações não existentes na realidade.

A análise pela via da simulação analógica permite a visualização imediata das consequências de variações dos diversos parâmetros e das demais condições do sistema de tração que o modelo analógico permite representar. Através do enfoque

digital, a análise pode ser realizada com maior nível de detalhamento na representação do sistema. Porisso a via analógica é muito util no levantamento dos casos mais críticos os quais podem depois ser examinados com mais cuidado através da análise digital.

O modelo analógico é apresentado no capítulo VI.

3.4 - Proposição de um Modelo para a Simulação do Sistema de Tração pela Via Digital

Conforme observado anteriormente, o cálculo pela via da computação digital da tensão desenvolvida na linha de contato, durante o processo de aceleração da locomotiva, pressupõe a definição de modelos para a representação da locomotiva, da linha alimentação e do sistema primário. O objetivo visado nesta secção consiste em apresentar um modelo para o sistema de tração o qual propicie efetuar o cálculo, pela via digital, do perfil de tensões ao longo da linha. Um dos modelos para a locomotiva consiste em poder representá-la como uma fonte de harmônicos de corrente. Para isto, conforme já ressaltado, dados completos sobre a corrente da locomotiva precisam estar disponíveis. Nem sempre, no entanto, estes dados estão realmente disponíveis. Mas esta não é a única representação possível; a locomotiva também pode ser representada através de um outro modelo envolvendo uma combinação de tiristores e parâmetros de indutância [32]. Para os objetivos da análise que se pretende realizar, as operações de chaveamento a que os tiristores da ponte retificadora estão constantemente submetidos, durante a fase de aceleração da locomotiva, precisam ser adequadamente contempladas no modelo. Desta forma, torna-se imprescindível examinar detidamente a operação da ponte durante um ciclo de variação da tensão de alimentação para que todos os aspectos que precisam ser considerados na representação sejam devidamente captados. Assim, será examinado o funcionamento de uma ponte composta de duas unidades retificadoras conectadas em cascata e operando em sequência.

Conforme indicado na figura 3.2, o tiristor T_1 da unidade retificadora que dispara primeiro será gatilhado no instante $t=t_1$, com ângulo mínimo de disparo. Seguir-se-á um período Δt_1 de sobreposição após o qual este tiristor estará conduzindo plenamente.

No instante $t=t_3$ ocorre o gatilhamento do tiristor T_3, seguindo-se um intervalo Δt_3 de sobreposição após o qual ambos os tiristores estarão conduzindo plenamente. Como é suficiente examinar os fenômenos que ocorrem em um semi-ciclo, a análise feita a seguir termina em $t=t_f$.

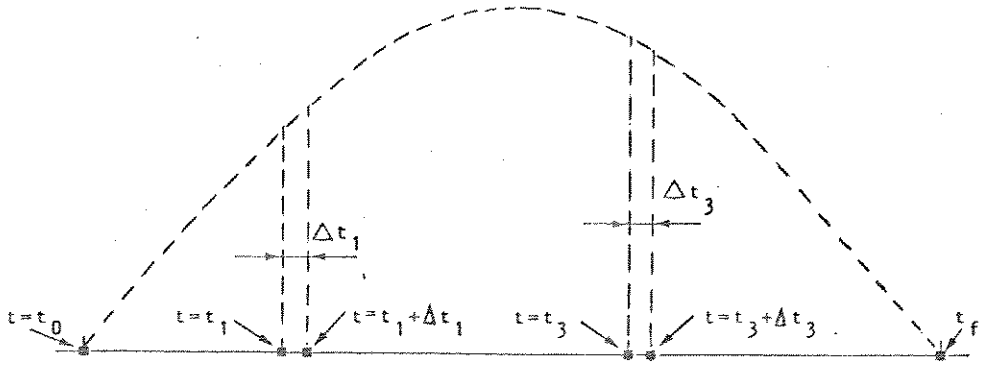


Figura 3.2 - Instantes de gatilhamento dos tiristores.

Como o intervalo de tempo de análise pode ter magnitude de mesma ordem de grandeza de um semi-período da onda de tensão aplicada ao retificador, entendeu-se necessário propor que se considere a variação desta tensão com o tempo, embora uma análise mais simplificada possa ser feita com um valor constante de tensão [32]. Sabe-se que, durante o semi-período de evolução da tensão, as unidades retificadoras da ponte apresentam diversas configurações diferentes em razão das operações de chaveamento que estão ocorrendo neste intervalo de tempo.

A figura 3.3 (a) apresenta a configuração representativa das condições de operação da ponte retificadora, para o intervalo de tempo que se segue ao início do semi-ciclo posi-

tivo da tensão (após decorrido o intervalo de sobreposição do diodo). Durante o intervalo em que se aplica esta configuração, não circula corrente pela linha de contato. Os terminais do enrolamento secundário do transformador da locomotiva estão ambos em circuitos aberto e a corrente I_m do motor circula apenas pelos diodos. Assim, até o instante $t=t_1$, a linha de contato poderá ter atingido uma condição de operação em regime permanonte.

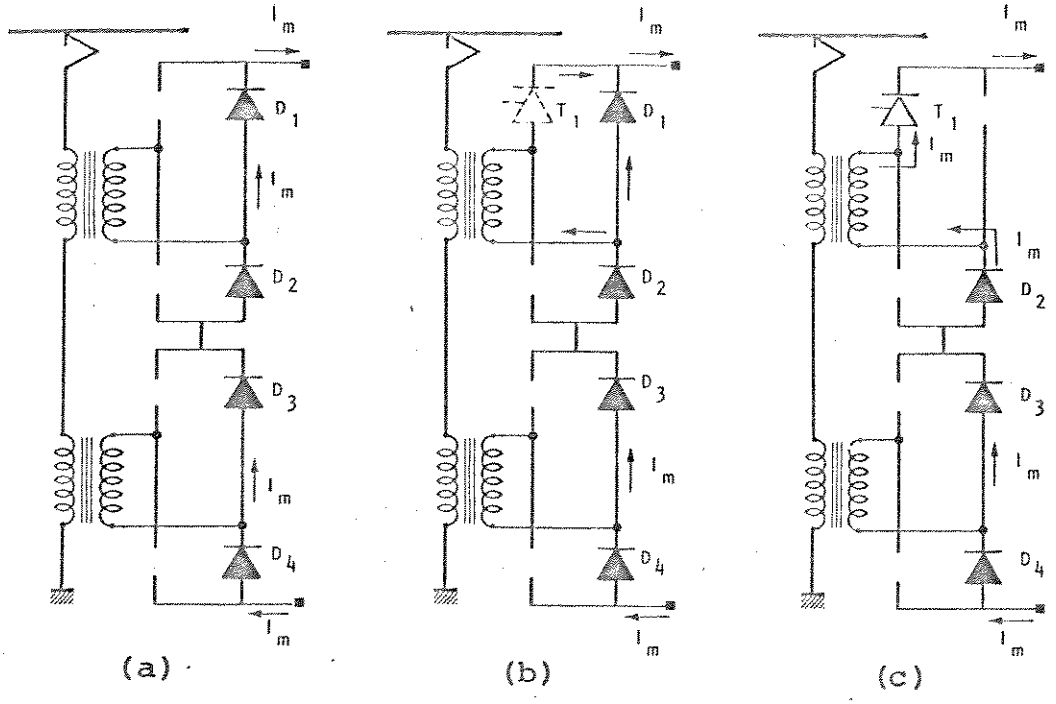


Figura 3.3 - Configurações da unidade retificadora superior.

A partir do instante $t=t_1$ passa a vigorar a configuração apresentada na figura 3.3(b). Esta situação perdura apenas durante o intervalo Δt_1 no qual estão simultaneamente em condução o tiristor T_1 e os diodos D_1 e D_2. Neste intervalo, os terminais do enrolamento secundário do transformador da unidade superior estão em curto-circuito e a corrente na linha pode apresentar uma subida bem rápida. Quando o diodo D_1 deixar

de conduzir, passa a se aplicar a configuração apresentada na figura 3.3(c).

Em $t=t_3$, com o gatilhamento do tiristor T_3 , passa a vigorar a configuração apresentada na figura 3.4(a) a qual se aplica apenas durante o intervalo Δt_3 e é semelhante à configuração da figura 3.3(b). Após o instante $t=t_3 + \Delta t_3$ e até o instante $t=t_f$ (figura 3.2) aplica-se a configuração apresentada na figura 3.4(b). No início do processo de aceleração, apenas a unidade retificadora superior estará em operação. Neste caso o instante $t=t_1$ pode apresentar considerável variação. Quando ambas as unidades estão em operação, o instante t_1 pode ser considerado fixo mas o instante t_3 pode apresentar uma boa variação. Neste caso, o tempo de duração da configuração apresentada na figura 3.4(b) pode variar bastante. Em princípio, os instante t_1 e t_3 são absolutamente gerais sendo necessário apenas observar que há um valor mínimo e outro máximo para o ângulo de gatilhamento.

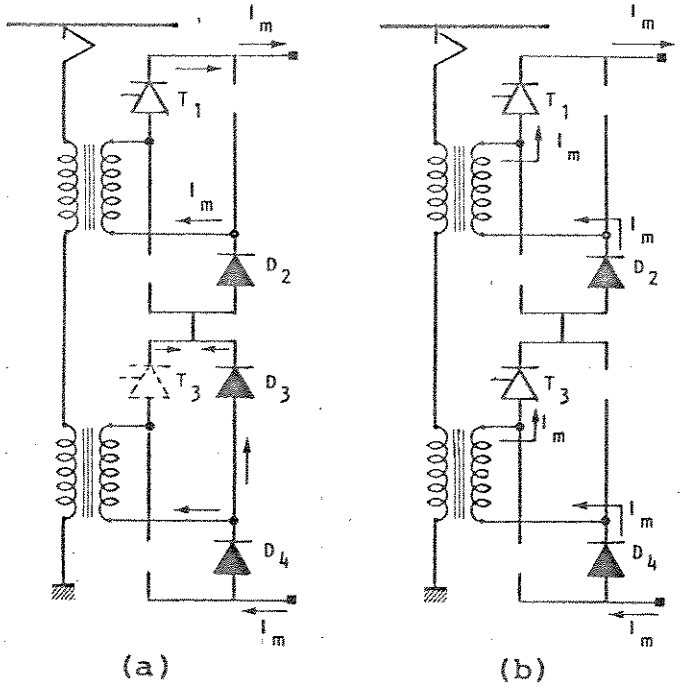


Figura 3.4 - Configurações da unidade retificadora inferior.

Quanto à linha de contato, esta foi representada pelos seus parâmetros de indutância e de resistência ôhmica dis-

tribuídos ao longo de seu comprimento, conforme indicado no início do capítulo IV. Como o tratamento do problema foi feito através do algoritmo devido a Schnyder e Bergeron, não foram utilizados modelos concentrados para a representação da linha de alimentação. A rede primária foi representada através de uma fonte senoidal de tensão operando em 60 Hz conectada em série com a impedância correspondente aos parâmetros do transformador da subestação.

A representação final proposta é apresentada na figura 3.5.

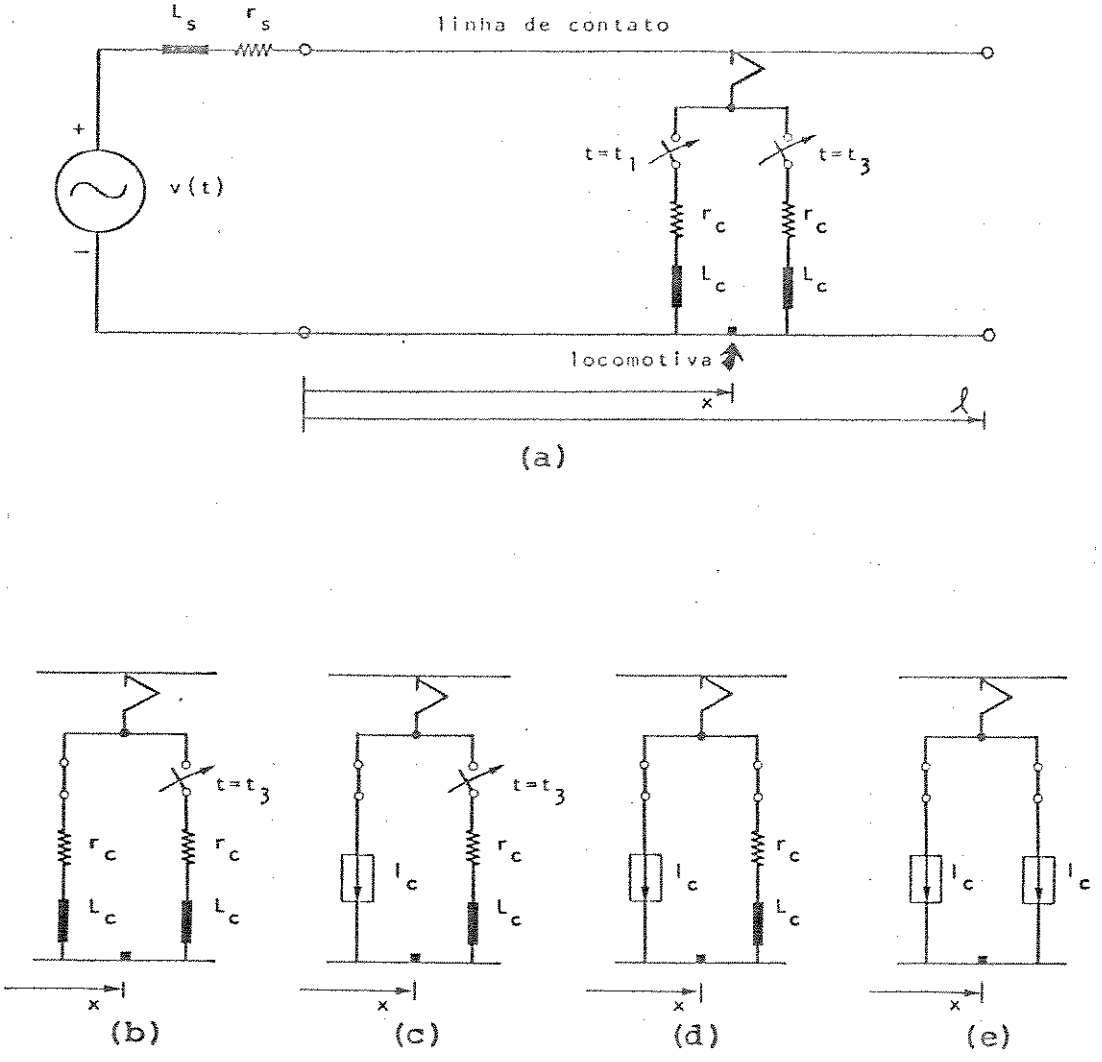


Figura 3.5 - Representação do sistema de tração.

Nesta figura, r_s e L_s são os parâmetros de resistência ôhmica e indutância do transformador da subestação;

r_c e L_c são os parâmetros correpondentes para a locomotiva. A locomotiva está localizada em uma posição genérica x que pode ser variada entre x=0 e x=ℓ e v(t) é a tensão senoidal da subestação. Observe-se que a figura 3.5(a), com ambas as chaves abertas, corresponde à configuração apresentada na figura 3.3(a). As figuras 3.5(b) e 3.5(c) correspondem, respectivamente às figuras 3.3(b) e 3.3(c). As figuras 3.5(d) e 3.5(e) correspondem, respectivamente às figuras 3.4(a) e 3.4(b). O fechamento das chaves representa o gatilhamento de tiristores.

Através do modelamento proposto na figura 3.5, o estudo do comportamento da tensão da linha de contato, nos instantes que se seguem ao gatilhamento dos tiristores, pode ser realizado através do estudo de uma linha de transmissão à qual está conectada, em uma posição genérica ao longo de seu comprimento, uma carga especial. Esta carga apresenta variações características as quais correspondem às mudanças que ocorrem nas configurações que a ponte apresenta durante o seu funcionamento em um meio período de variação da tensão.

Dois instantes importantes precisam ser ressaltados:

- O instante em que um tiristor é gatilhado.

- O instante em que, terminado o período de sobreposição, a corrente da linha passa a apresentar a mesma variação da corrente do motor (cuja oscilação é limitada pela ação do reator de alisamento).

Cada um destes dois instantes (ambos podem ocorrer por duas vezes no semi-período) constituem momentos em que surgem pertubações na linha de contato as quais se propagam em ambas as direções a partir da posição em que são geradas.

No próximo capítulo, procurar-se-á desenvolver uma forma de tratamento matemático que permita equacionar todas as situações examinadas neste capítulo. O objetivo final consiste em calcular o perfil de tensões ao longo da linha de contato no

intervalo de tempo que se inicia em $t=t_1$ e que termina em $t=t_f$.

Antes de se concluir este capítulo, é interessante tecer algumas considerações a respeito da forma através da qual se pode chegar à solução do problema.

3.5 - Considerações Acerca do Problema a ser Resolvido

Ao que se pode depreender do item 3.4, o problema cuja solução se deseja encaminhar pode ser formulado como um problema de linha de transmissão. A figura 3.6 apresenta a representação que corresponde a esta formulação.

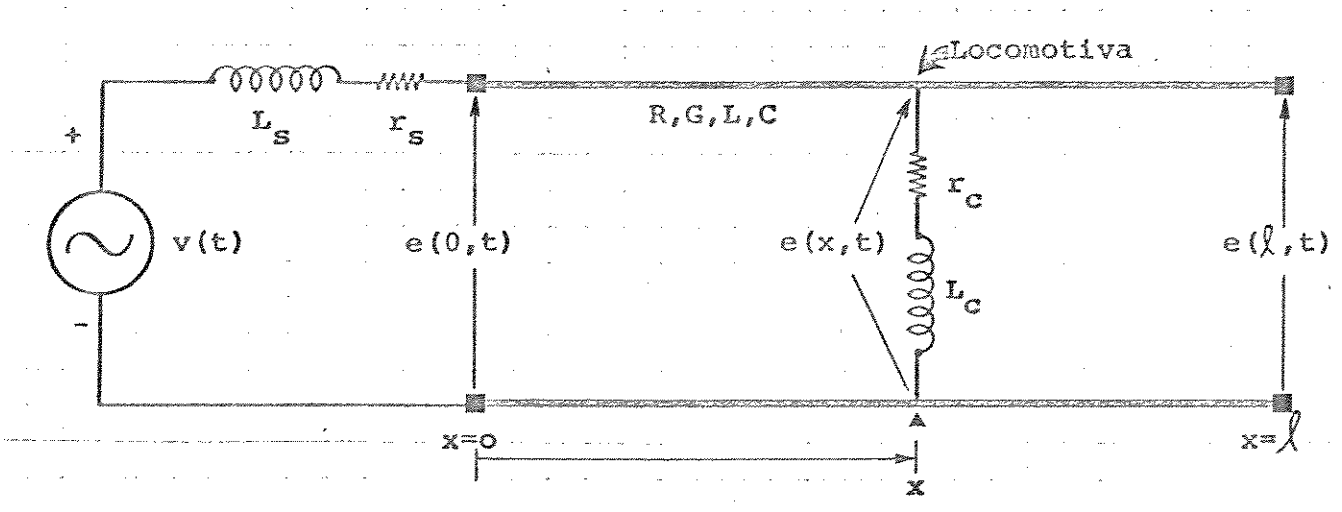


Figura 3.6: Caracterização do problema a ser resolvido.

O trecho de linha de comprimento ℓ apresentado na figura 3.6 está caracterizado através dos parâmetros R, G, L e C, todos por unidade de comprimento, e que representam, respectivamente, a resistência ôhmica, a condutância para terra, a indutância e a capacitância desta linha.

As seguintes equações podem ser escritas:

$$Ri + L\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial x} = 0 \qquad (3.1)$$

$$Ge + C\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} = 0 \qquad (3.2)$$

em que e(x,t) e i(x,t) são, respectivamente, a tensão e a corrente em qualquer ponto ao longo do comprimento da linha e em qualquer instante de tempo. Existem diversas maneiras de se buscar a solução destas equações diferenciais parciais. Uma das mais conhecidas consiste em aplicar a transformada de Laplace às expressões (3.1) e (3.2). Neste caso obtém-se a solução:

$$e(x,s) = E_1(s)e^{-\gamma(s)x} + E_2(s)e^{\gamma(s)x} \qquad (3.3)$$

em que

$$\gamma(s) = \{(R + sL)\ (G + sC)\}^{1/2} \qquad (3.4)$$

é a função de propagação e onde as funções $E_1(s)$ e $E_2(s)$ dependem das condições de contorno da linha. Como interessa obter e(x,t), a tranformação inversa deve ser aplicada à equação (3.3). Nem sempre será possível obter e(x,t) pela via analítica. No problema que está sendo estudado, é desejável considerar a presença de perdas. Por outro lado, os coeficientes de reflexão são, em princípio, funções complexas e a locomotiva deve poder ser deslocada para qualquer posição ao longo da linha. Estas condições influenciam o tipo de solução que pode ser encontrada. Quando a linha apresenta perdas, a função de propagação não pode depender linearmente de s. Neste caso não é possível obter solução analítica. Mesmo que a linha não apresente distorção (RC = LG) ou que seja simplesmente sem perdas (R = G = 0), dependendo das condições de contorno somente a solução numérica

será possível. Referindo-se à figura 3.6, se a locomotiva se encontra no final da linha ($x = \ell$), e se os coeficientes de reflexão em ambas as terminações da linha forem funções de s, certamente será difícil obter solução pela via analítica, mesmo com R e G nulos, por causa da ocorrência de múltiplas reflexões. Embora a localização da locomotiva no final do trecho constitua uma condição importante com relação a sobretensões, é necessário poder, em princípio, colocar a locomotiva em qualquer posição no trecho. Neste caso, mesmo na ausência de perdas, é recomendada a solução pela via numérica porque a função equivalente ao trecho de linha localizado à direita da posição em que se encontra a locomotiva não é uma função racional de s, o que inviabiliza a obtenção, pela via analítica, da função no tempo.

Dadas as características do problema, trata-se de encontrar um método numérico oficiente que permita obter as soluções desejadas. Para o caso em que a locomotiva está no final do trecho podem ser obtidas soluções analíticas interessantes para a visualização do processo de evolução da tensão ao longo da linha, durante a ocorrência do fenômeno transitório.

No próximo capítulo será apresentada uma forma de solução que considera a linha sem perdas mas que permite adaptar a solução para o caso em que a linha apresente perdas e que é facilmente aplicável, independemente da posição da locomotiva.

CAPÍTULO IV

PERFIL DE TENSÕES AO LONGO DA LINHA DE CONTATO

Verificou-se, no capítulo anterior, que os processos de gatilhamento e de comutação dos semicondutores da ponte retificadora acabam por submeter a linha de contato a perturbações as quais constituem processos transitórios eletromagnéticos que influenciam as magnitudes de tensão. Verificou-se também que o problema pode ser colocado sob a forma de um problema específico de linha de transmissão. Neste capítulo serão examinadas formas de emprego da solução da equação hiperbólica da linha pelo método de ondas viajantes na obtenção do perfil de tensões nos instantes que se seguem ao gatilhamento e à comutação dos tiristores.

4.1 - Aplicação do Método de Ondas Viajantes

Assumindo-se que a linha não apresenta perdas, as seguintes equações diferenciais parciais podem ser escritas:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial x} = 0 \qquad (4.1)$$

$$C \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial i}{\partial x} = 0 \qquad (4.2)$$

Naturalmente, a presença de perdas pode vir a ser considerada posteriormente.

A solução de D'Alembert para o sistema de equações (4.1) e (4.2) pode ser escrita na forma:

$$i(x,t) = f(x - ut) + g(x + ut) \qquad (4.3)$$

$$e(x,t) = Z_o\ f(x - ut) - Z_o\ g(x + ut) \qquad (4.4)$$

em que $Z_o = \{L/C\}^{1/2}$ e $u = 1/\{LC\}^{1/2}$ são, respectivamente, a impedância característica da linha e a velocidade de propagação do fenômeno. As funções f e g são arbitrárias. A primeira descreve uma onda viajando na linha, com velocidade u, na direção positiva do eixo x e a segunda descreve outra onda, nas mesmas condições, mas viajando no sentido oposto.

As equações (4.3) e (4.4) constituem a base de dois métodos conhecidos para o tratamento de transitórios em linhas de transmissão. Um deles é o método do diagrama de treliças (Lattice Diagram Method) devido a Bewley [33] e o outro é o método de Schnyder-Bergeron. Ambos, originalmente métodos gráficos, foram posteriormente adaptados para o uso em computadores digitais [34]. No problema em questão, como se trata de uma linha monofásica simples, é possível aplicar o método do diagrama de treliças e obter uma solução analítica, para o caso em que a locomotiva se encontra no final do trecho de linha. Ao fim deste capítulo será apresentada uma breve exposição acerca de como é feita esta aplicação. Como, no entanto, a locomotiva deve poder se colocar em qualquer posição ao longo da linha, preferir-se-á obter soluções numéricas através de um algoritmo que pode ser desenvolvido a partir do método de Schnyder-Bergeron.

4.2 - Os Princípios do Método de Schnyder-Bergeron

A conceituação deste método é devida a Schnyder, 1929 e Bergeron, 1935 mas a sua aplicação ao cálculo dos transi-

tórios eletromagnéticos é devida ao trabalho de Dommel [35]. Através de algoritmo desenvolvido a partir do método é possível utilizar o computador digital para calcular estes transitórios em linhas de transmissão a parâmetros constantes e que não apresentem perdas. Embora aplicável a linhas sem perdas, sempre que a condutância para terra puder ser desprezada, é possível incluir no tratamento uma aproximação para as perdas série. O procedimento para o caso consiste em tratar a linha como se esta fosse sem perdas e incluir, de alguma maneira, a resistência série da linha como um parâmetro concentrado [36].

Para obter as expressões em que se baseia o método de Schnyder-Bergeron, basta reescrever as equações (4.3) e (4.4) [37]:

$$e(x,t) + Z_o\ i(x,t) = 2Z_o\ f(x - ut) \qquad (4.5)$$

$$e(x,t) - Z_o\ i(x,t) = -2Z_o\ g(x + ut) \qquad (4.6)$$

Observe-se, pela equação (4.5), que quando o argumento x-ut é constante, um observador que se mover com velocidade u, na direção positiva do eixo x, verá a expressão $e(x,t) + z_o\ i(x,t)$ sempre constante. Este fato, característico do método, permite relacionar tensões e correntes em posições diversas da linha e em instantes diferentes. As equações (4.5) e (4.6) referem-se apenas à linha de transmissão. Mas em determinadas posições ao longo da linha existem circuitos externos conectados, como é o caso da subestação que alimenta a linha. A solução do problema consiste em combinar adequadamente as equações para a linha com as equações que podem ser escritas para estas posições em função dos circuitos a elas conectados.

Algoritmos baseados no método de Schnyder-Bergeron já vem sendo utilizados, a algum tempo, no cálculo de fenômenos transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Nas análises que são feitas nestes sistemas, usualmente interessa apenas calcular variáveis nodais (isto é, variáveis de nós, ou de barras, destes sistemas). Assim, para as diversas linhas de

transmissão que interligam barras do sistema de potência, via de regra, são apenas calculados os valores de variáveis das terminações das mesmas.

No sistema de tração elétrica que está sendo estudado, o problema a ser resolvido envolve inclusive o cálculo de tensões e correntes, nos mais diversos pontos ao longo da linha, e em diferentes circunstâncias.

As deduções matemáticas que vem a seguir, neste capítulo, tem por objetivo apresentar os desenvolvimentos que tiveram de ser realizados, neste trabalho, com o fim de adequar o método de Schnyder-Bergeron a mais esta aplicação específica.

O presente método se desenvolve e produz soluções diretamente no domínio do tempo, sem fazer uso de quaisquer transformações. A cada intervalo t de tempo todas as tensões são calculadas a partir de informações anteriores. Como o problema exige a divisão do trecho de linha em segmentos, optou-se por incluir metade da resistência série de cada segmento em cada um dos extremos do mesmo. Com isto as perdas série podem ser consideradas de maneira aproximada sem que o procedimento apresente qualquer modificação que, pela sua profundidade, descaracterize a simplicidade que consagra o uso deste método no cálculo digital dos transitórios eletromagnéticos.

No equacionamento que vem a seguir será considerada a operação sequencial de uma ponte retificadora dupla em um meio período de evolução da tensão aplicada à mesma. Conforme se observou na figura 3.2, os tiristores T_1 e T_3 são gatilhados neste intervalo. O instante em que o tiristor T_1 é gatilhado será considerado o instante t = 0 em que o processo de simulação digital é iniciado. Posteriormente será gatilhado o tiristor T_3 e ambos permanecerão em condução até o instante $t=t_f$ quando tem início os seus processos de comutação.

Para a obtenção do perfil de tensões, o trecho de linha terá o seu comprimento dividido em n segmentos iguais, resultando n+1 posições ao longo do trecho nas quais serão definidos n+1 valores de tensões e n+2 valores de correntes. Sendo T o tempo de percurso do trecho, os seguintes parâmetros podem ser definidos:

$$d = \ell/n \tag{4.7}$$

$$\theta = T/n \tag{4.8}$$

em que d é o comprimento e θ o tempo de percurso de cada um dos n segmentos obtidos. Quanto à locomotiva, esta poderá estar localizada em qualquer posição $x = kd$, $k \in \{0, 1, 2, \ldots, n\}$, conforme apresentado na figura 4.1.

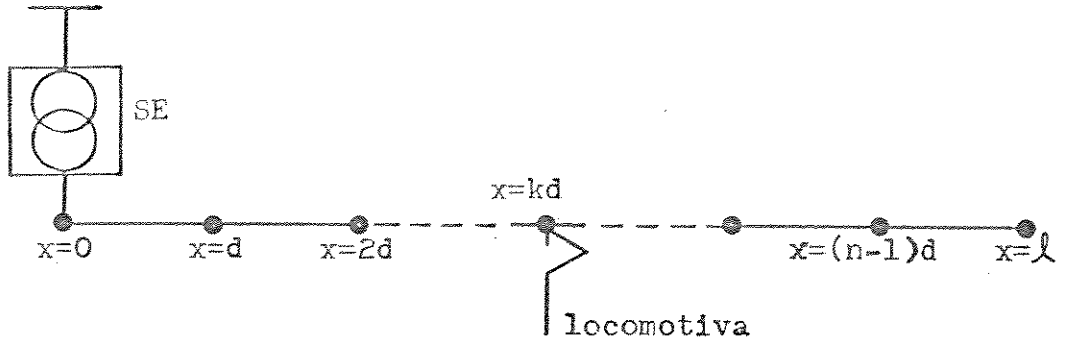


Figura 4.1: Posições da locomotiva ao longo da linha.

O processo tem início em t=0, com o gatilhamento do tiristor T_1 e a cada intervalo Δt são calculadas as tensões e (jd,t), j = 0, 1, 2, ..., n. Naturalmente, θ e Δt não precisam necessariamente coincidir.

O cálculo das tensões requer que sejam escritas, para cada trecho de linha, 2n equações baseadas na equação (4.5). Para cada um dos n segmentos em que o trecho de linha está subdividido são escritas duas destas equações. Apenas para sistematizar o procedimento, a primeira destas duas equações será escrita supondo-se um observador viajando no segmento no sentido da direita para a esquerda e a segunda equação será escrita com o movimento no sentido contrário. A figura 4.2 apresenta um segmento genérico, o j-ésimo segmento.

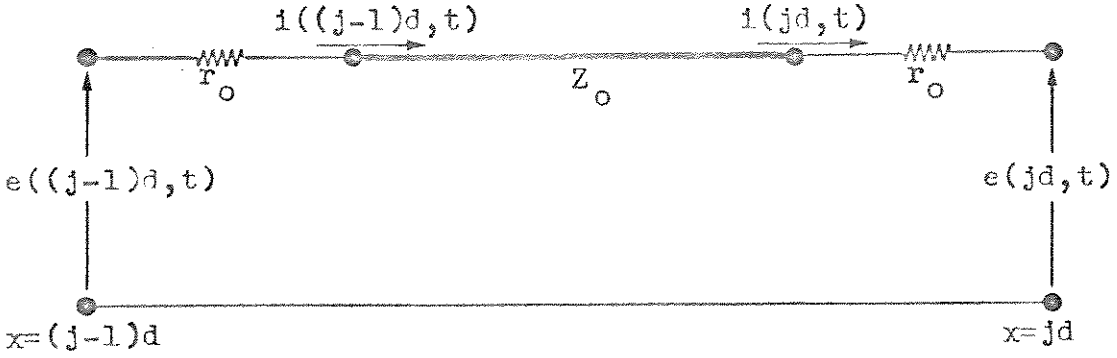


Figura 4.2: O segmento genérico.

Para o j-ésimo segmento, duas equações baseadas na equação (4.5) podem, portanto ser escritas. Observando-se a sistematização acima mencionada, vem:

$$e(jd,t-\theta) - Z_2 i(jd,t-\theta) = e[(j-1)d,t] - Z_1 i[(j-1)d,t] \qquad (4.9)$$

$$e[(j-1)d,t-\theta] + Z_2 i[(j-1)d,t-\theta] = e(jd,t) + Z_1 i(jd,t) \qquad (4.10)$$

em que

$$Z_1 = Z_o + r_o \qquad (4.11)$$

$$Z_2 = Z_o - r_o \qquad (4.12)$$

com

$$r_o = R_o/2n \tag{4.13}$$

em que R_o é a resistência ôhmica série do trecho de linha.

Das equações (4.9) e (4.10) resultam:

$$e[(j-1)d,t] = Z_1\ i[(j-1)d,t] - E_{2j-1} \tag{4.14}$$

$$e(jd,t) = -Z_1\ i(jd,t) - E_{2j} \tag{4.15}$$

em que

$$E_{2j-1} = -e(jd,t-\theta) + Z_2\ i(jd,t-\theta) \tag{4.16}$$

$$E_{2j} = -e[(j-1)d,t-\theta] - Z_2\ i[(j-1)d,t-\theta] \tag{4.17}$$

Para o j-ésimo segmento, a primeira equação que se escreve (dentro da sistemática mencionada anteriormente) dá origem à expressão de E_{2j-1} e a segunda equação dá origem à expressão de E_{2j} (veja-se a figura 4.3(a)). Variando-se j, desde j=1 (primeiro segmento) até j=n (último segmento), obtém-se n expressões de E com índices ímpares e outras n expressões de E com índices pares. Observe-se que E_{2j-1} é função da tensão e da corrente na posição x=jd enquanto E_{2j} depende da tensão e corrente da posição x=(j-1)d. Como este é um segmento absolutamente genérico, equações análogas às equações (4.14) e (4.15) podem simplesmente ser escritas por inspeção, para qualquer segmento.

Após escrever as 2n equações para o trecho de linha, será possível verificar que, substituidos os valores de corrente, na expressão de e(jd,t) sempre aparecem E_{2j} e E_{2j+1}, exceto se j=0, quando só aparece E_1 na expressão de e(0,t) e exceto se j=n, quando só aparece E_{2n} na expressão de e(ℓ,t). A figura 4.3(b) serve para ilustrar esta última observação.

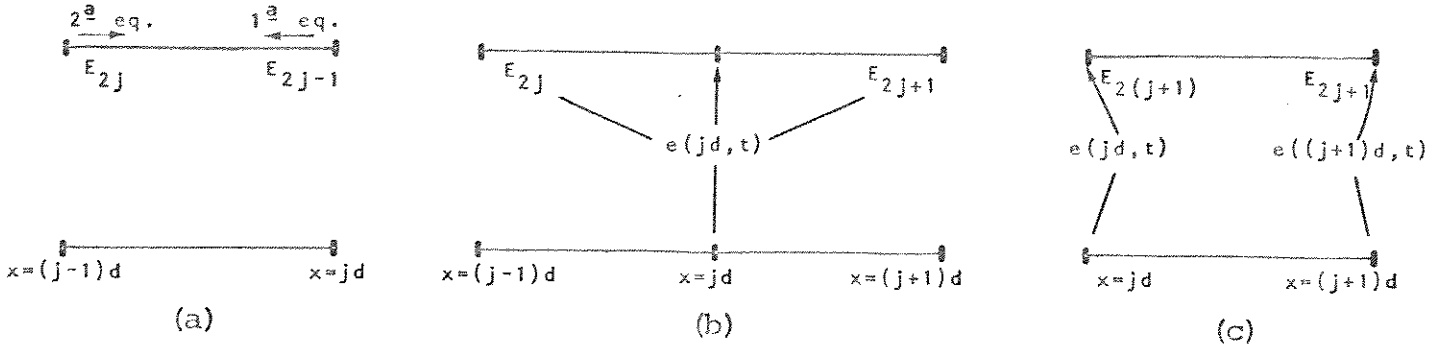


Figura 4.3: Equacionamento dos segmentos

Se for tomado o (j+1)-ésimo segmento (figura 4.3 (c)), equações análogas às equações (4.14) a (4.17) podem ser escritas:

$$e(jd,t) = Z_1\, i(jd,t) - E_{2j+1} \qquad (4.14')$$

$$e\left[(j+1)d,t\right] = -Z_1\, i\left[(j+1)d,t\right] - E_{2(j+1)} \qquad (4.15')$$

em que

$$E_{2j+1} = -e\left[(j+1)d,t-\theta\right] + Z_2\, i\left[(j+1)d,t-\theta\right] \qquad (4.16')$$

$$E_{2(j+1)} = -e(jd,t-\theta) - Z_2\, i(jd,t-\theta) \qquad (4.17')$$

Para facilitar a apresentação do procedimento de cálculo das tensões, é interessante admitir três casos diferentes, conforme a posição da locomotiva no trecho de linha:

Condição C_1: A locomotiva não se encontra nas terminações da linha (isto é, $k \neq 0$ e $k \neq n$).

Para esta condição há três tipos de tensões a calcular:

C_1 - (a): Tensão na posição genérica x = jd não coincidente com a posição x = kd em que se encontra a locomotiva.

Neste caso, tendo-se em vista a figura 4.4, as seguintes equações para o cálculo de e(jd,t) podem ser escritas (sabendo-se de antemão que e(jd,t) é função de E_{2j} e E_{2j+1}):

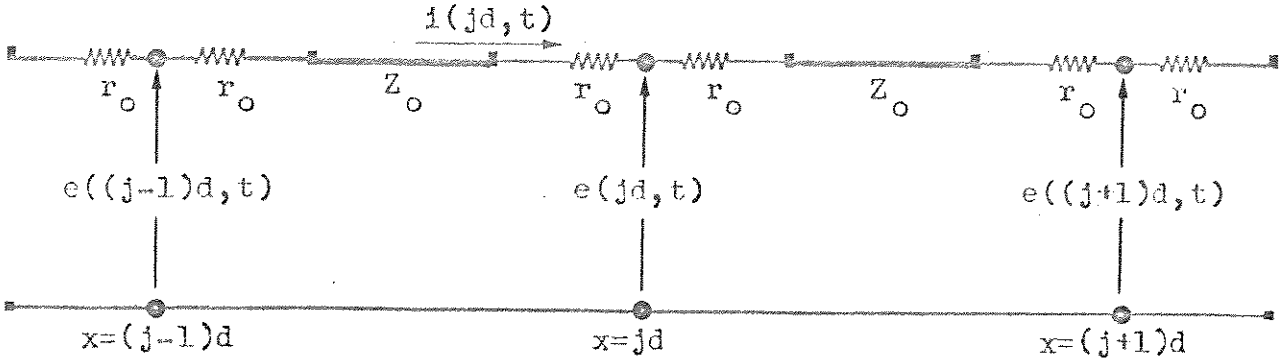


Figura 4.4: Tensão na posição genérica x = kd.

$$e(jd,t) = Z_1\ i(j,dt) - E_{2j+1} \qquad (4.18)$$

$$e(jd,t) = -Z_1\ i(j,dt) - E_{2j} \qquad (4.19)$$

em que a equação (4.18) é escrita supondo-se o movimento no sentido da direita para a esquerda, a partir da posição x = (j+1)d e a equação (4.19) supondo-se o movimento em sentido contrário, a partir da posição x = (j-1)d. Somando-se as equações (4.18) e (4.19) obtém-se:

$$e(jd,t) = -0,5\{E_{2j} + E_{2j+1}\} \quad ; \quad j \neq k \qquad (4.20)$$

Observe-se que se o valor de j for variado no intervalo $0 < j < n$, com j assumindo qualquer valor distinto de k, serão obtidas n-2 equações análogas à equação (4.20). Através destas equações são obtidas diretamente n-2 das n+1 tensões que se quer calcular, faltando apenas obter as tensões nas termina-

ções da linha e na própria locomotiva. A expressão das correntes i(jd,t) se obtem combinando-se as equações (4.18) e (4.19).

C_1 - (b): Tensão na posição x=0 em que a linha é conectada à subestação.

Referindo-se à figura 4.5 e sabendo-se que a tensão e(0,t) é função de E_1 , resulta:

$$e(0,t) = Z_1\ i(0,t) - E_1 \qquad (4.21)$$

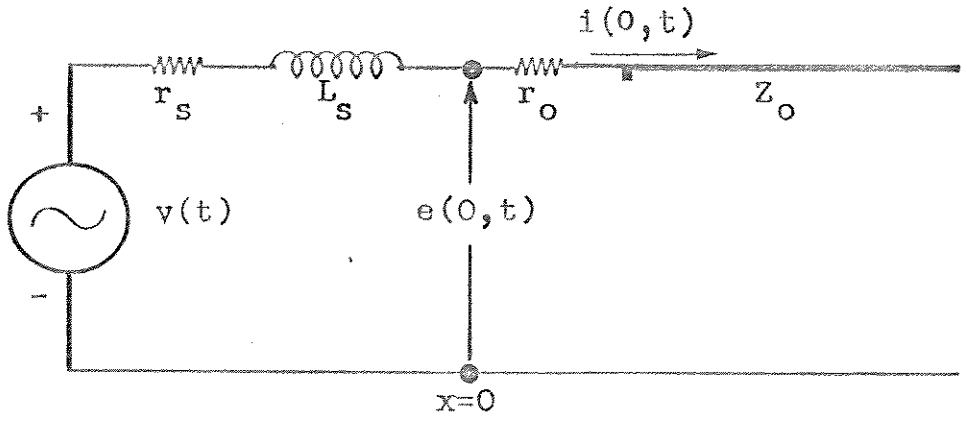


Figura 4.5: Tensão na subestação.

Neste caso, a tensão e(0,t) não pode ser obtida diretamente apenas através da equação (4.21) escrita para a linha. Isto ocorre porque a subestação SE se encontra conectada à linha na posição x = 0. Será necessário escrever uma equação para a subestação. As n-2 tensões calculadas diretamente através da equação (4.20) correspondem a posições ao longo da linha às quais nenhum circuito está conectado. Da figura 4.5 resulta:

$$v(t) - e(0,t) = r_s\ i(0,t) + L_s \frac{d}{dt} i(0,t) \qquad (4.22)$$

Esta equação pode ser integrada no intervalo Δt, obtendo-se (veja o Apêndice I):

$$e(0,t) = v(t) - (r_s + R_s)\, i(0,t) - E_s \qquad (4.23)$$

em que

$$R_s = 2L_s/\Delta t \qquad (4.24)$$

$$E_s = (r_s - R_s)\, i(0,t - \Delta t) - v(t - \Delta t) + e(0,t - \Delta t \qquad (4.25)$$

As equações (4.21) e (4.23) podem ser agora combinadas, resultando:

$$e(0,t) = \frac{1}{1 + A_s} \{v(t) - E_s - A_s E_1\} \qquad (4.26)$$

em que

$$A_s = (r_s + R_s)/Z_1 \qquad (4.27)$$

A expressão da corrente i(0,t) também precisa ser obtida porque esta corrente entra no cálculo de E_s. Utilizando-se a equação (4.21), vem:

$$i(0,t) = 1/Z_1 \{e(0,t) + E_1\} \qquad (4.28)$$

C_1 - (c): Tensão na posição x = kd (locomotiva).

Com referência à figura 4.6 as seguintes equações podem ser escritas:

$$e(kd,t) = Z_1\{i'(kd,t) - i(kd,t)\} - E_{2k+1} \qquad (4.29)$$

$$e(kd,t) = -Z_1\, i'(kd,t) - E_{2k} \qquad (4.30)$$

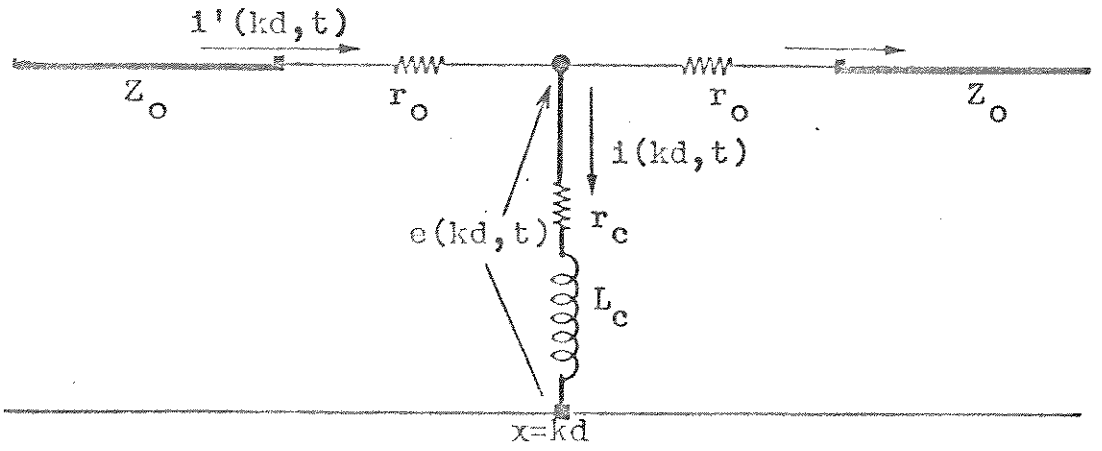


Figura 4.6: Tensão na locomotiva

A equação (4.29) foi escrita supondo-se o movimento no sentido da direita para a esquerda a partir da posição $x = (k+1)d$ e a equação (4.30) supondo-se o movimento no sentido contrário, a partir de $x = (k-1)d$. Para chegar à expressão da tensão $e(kd,t)$ é necessário escrever uma equação para a locomotiva. Portanto:

$$e(kd,t) = r_c\, i(kd,t) + L_c \frac{d}{dt} i(kd,t) \qquad (4.31)$$

de onde, após integração no intervalo Δt: (Apêndice I)

$$e(kd,t) = (r_c + R_c)\, i(kd,t) + E_c(kd) \qquad (4.32)$$

em que

$$R_c = \frac{2L_c}{\Delta t} \qquad (4.33)$$

$$E_c(kd) = (r_c - R_c)\, i(kd, t - \Delta t) - e(kd, t - \Delta t) \qquad (4.34)$$

Agora as equações (4.29), (4.30) e (4.32) podem ser combidas, resultando:

$$e(kd,t) = \frac{1}{1 + 2A_c} \{E_c(kd) - A_c(E_{2k} + E_{2k+1})\} \qquad (4.35)$$

em que

$$A_c = \frac{r_c + R_c}{Z_1} \qquad (4.36)$$

Como E (kd) é função de i(kd,t) então é necessário obter a expressão desta corrente. Da equação (4.32) vem:

$$i(kd,t) = \frac{1}{r_c + R_c} \{e(kd,t) - E_c(kd)\} \qquad (4.37)$$

C_1 - (d): Tensão na terminação $x=\ell$ da linha.

No sistema em questão, usualmente a terminação mais remota em relação à subestação fica em aberto. Assim, com referência à figura 4.7, vem:

$$e(\ell,t) = -Z_1 \; i(\ell,t) - E_{2n} \qquad (4.28)$$

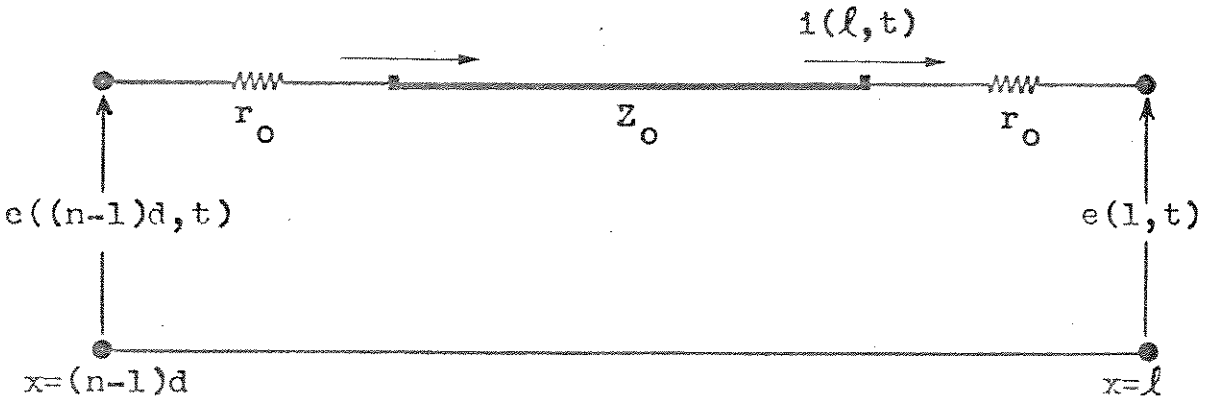


Figura 4.7: Tensão no final da linha.

Considerando-se que $i(\ell,t)=0$, por fim obtém-se:

$$e(\ell,t) = -E_{2n} \qquad (4.39)$$

Para concluir o estudo da primeira parte da condição C_1 é necessário considerar o que vai ocorrer após o instante $t= \Delta t_1$ em que o diodo D_1 deixa de conduzir.

A partir deste instante, a corrente na posição $x = kd$ onde está a locomotiva deve ficar constante porque a corrente do motor vai ficar constante. Esta situação é visualizada na figura 4.8 em que I_c é uma corrente de intensidade constante.

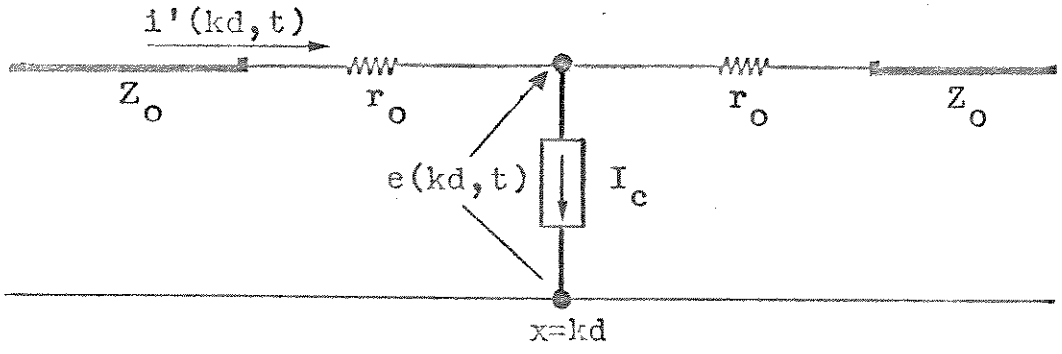


Figura 4.8: Tensão na Locomotiva ($t > \Delta t_1$).

A expressão utilizada para o cálculo da tensão $e(kd,t)$ nestas novas condições deve ser obtida combinando-se a equação (4.30) com a equação (4.29) escrita para $i(kd,t) = I_c$. Após as devidas manipulações, vem:

$$e(kd,t) = -0,5\{Z_1 I_c + E_{2k} + E_{2k+1}\} \qquad (4.40)$$

As expressões para o cálculo da demais tensões ficam inteiramente inalteradas após o término do período de sobreposição.

No instante $t=t_3$ deverá ocorrer o gatilhamento do tiristor T_3 fazendo entrar em operação a segunda unidade retificadora da ponte. A partir deste instante, a corrente na linha, na posição $x = kd$, passa a se escrever $i(kd,t) + I_c$ (veja-se a figura 3.5(d)). Para considerar esta nova condição basta somar a quantidade I_c à equação (4.37) e voltar a calcular a tensão $e(kd,t)$ através da equação (4.35). A partir do instante $t = t_3 + \Delta t_3$ já terá terminado o período de sobreposição do tiristor T_3 e a tensão $e(kd,t)$ deverá voltar a ser calculada através de uma expressão análoga à equação (4.40) obtida combinando-se a equação (4.30) com a equação (4.29) escrita para $i(kd,t) = 2I_c$.

Condição C_2: A locomotiva se encontra na subestação (isto é, $k=0$)

Esta situação é mostrada na figura 4.9

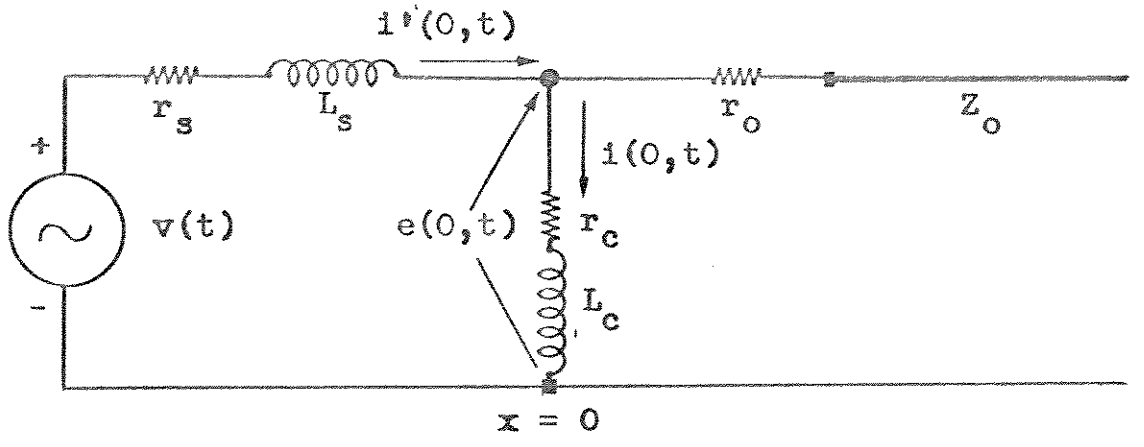


Figura 4.9: Locomotiva na subestação.

Para esta condição há dois tipos de tensões a calcular:

C_2 - (a): Tensão $e(jd,t)$ na posição genérica $j \neq k$

As tensões $e(jd,t)$, com $j = 1, 2, \ldots, n-1$ são todas obtidas através da equação (4.20). A tensão $e(\ell,t)$ é obtida através da equação (4.39).

C_2 - (b): Tensão e(kd,t) na locomotiva

Neste caso, além das equações (4.21) e (4.23), as quais continuam sendo aplicáveis com as devidas alterações indicadas na figura 4.9, será ainda necessário escrever mais uma equação para levar em conta a posição da locomotiva.

Da equação (4.21) vem:

$$e(0,t) = Z_1\{i'(0,t) - i(0,t)\} - E_1 \qquad (4.41)$$

Da equação (4.23) vem:

$$e(0,t) = v(t) - (r_s + R_s)\, i'(0,t) - E_s \qquad (4.42)$$

em que, agora:

$$E_s = (r_s - R_s)\, i'(0,t - \Delta t) - v(t - \Delta t) + e(0,t - \Delta t) \qquad (4.43)$$

Portanto, além das equações (4.41) e (4.42) é necessário ainda escrever a equação:

$$e(0,t) = (r_c + R_c)\, i(0,t) + E_c(0) \qquad (4.44)$$

em que

$$E_c(0) = (r_c - R_c)\, i(0,t - \Delta t) - e(0,t - \Delta t) \qquad (4.45)$$

Esta última equação foi obtida através de integração no intervalo Δt (veja Apêndice I) da equação:

$$e(0,t) = r_c\, i(0,t) + L_c \frac{d}{dt} i(0,t) \qquad (4.46)$$

Agora as equações (4.41), (4.42) e (4.44) podem ser combinadas, resultando:

$$e(0,t) = \frac{1}{A_c + A_s + A_c A_s} \{A_c [v(t) - E_s] + A_s E_c(0) - A_c A_s E_1\} \quad (4.47)$$

Como $i(0,t)$ e $i'(0,t)$ entram no cálculo de E_s e $E_r(0)$, respectivamente, então será necessário calculá-las. Da equação (4.42) vem:

$$i'(0,t) = \frac{1}{r_s + R_s} \{v(t) - e(0,t) - E_s\} \quad (4.48)$$

Da equação (4.44) vem:

$$i(0,t) = \frac{1}{r_c + R_c} \{e(0,t) - E_c(0)\} \quad (4.49)$$

Ao terminar o intervalo de sobreposição do tiristor T_1, a corrente $i(0,t)$ assume o valor I_c, conforme apresentado na figura 4.10.

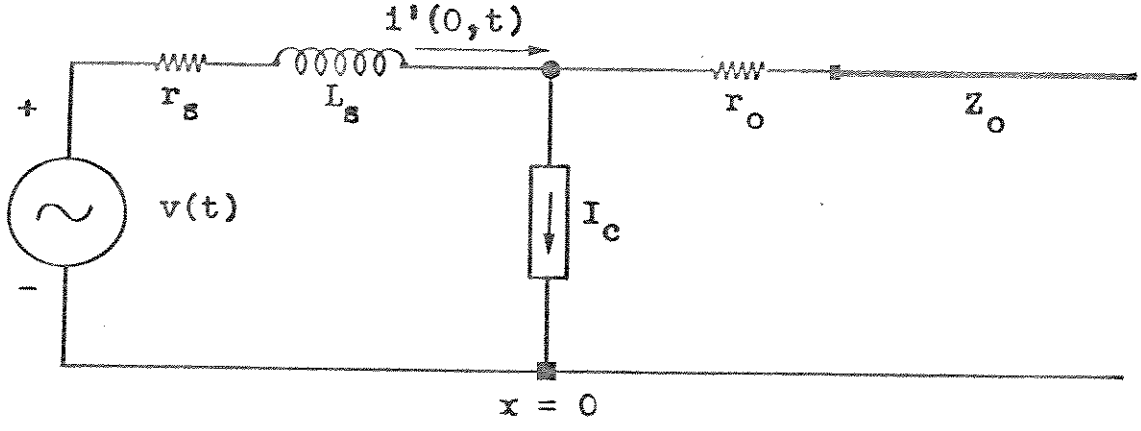


Figura 4.10: Tensão na subestação ($t > \Delta t_1$).

A expressão para o cálculo da tensão $e(0,t)$, nestas novas condições deve ser obtida da equação (4.42) e da equação (4.41) em que se faz $i(0,t)=I_c$. Fazendo-se as manipulações algébricas, resulta:

$$e(0,t) = \frac{1}{1 + A_s} \{v(t) - E_s - A_s[Z_1 I_c + E_1]\} \qquad (4.50)$$

As tensões nas demais posições continuam a ser calculadas como antes do final da comutação.

No instante $t = t_3$ ocorre o gatilhamento do tiristor T_3. Torna-se necessário acrescentar a quantidade I_c à equação (4.49) e voltar a calcular a tensão e(0,t) através da expressão (4.47). Após decorrido o instante $t_3 + \Delta t_3$, a tensão e(0,t) passa a ser calculada através de uma expressão análoga à equação (4.50), obtida combinando-se a equação (4.42) com a equação (4.41) escrita para $i(0,t) = 2I_c$.

Condição C_3: A locomotiva está no final do trecho (isto é, k=n).

Neste caso há três tipos de tensões a calcular:

C_3 - (a): Tensão na posição x=0 (subestação)

Esta tensão é calculada através da equação (4.26).

C_3 - (b): Tensão e(jd,t), j = 1, 2, ..., n-1

Estas tensões são todas calculadas pela equação (4.20).

C_3 - (c): Tensão na posição terminal $x = \ell$ (na locomotiva)

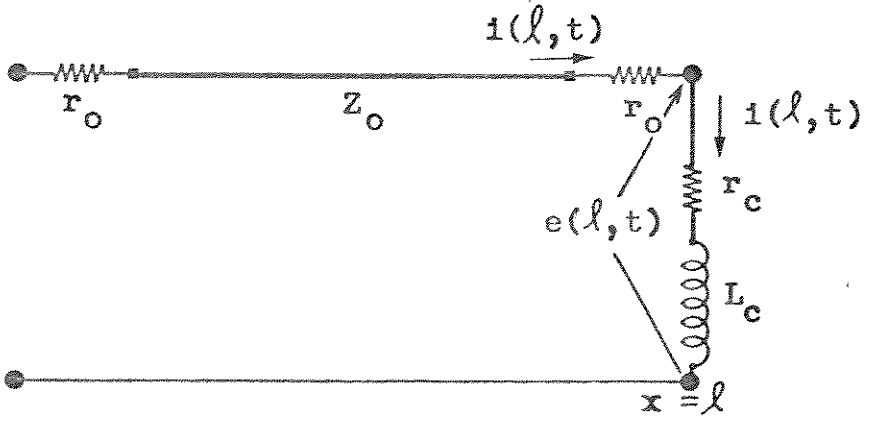


Figura 4.11: Locomotiva no final da linha.

De acordo com a figura 4.11, a expressão de $e(\ell,t)$ é obtida da combinação da equação (4.38) com a equação:

$$e(\ell,t) = (r_c + R_c)\, i(\ell,t) + E_c(\ell) \qquad (4.51)$$

em que

$$E_c(\ell) = (r_c - R_c)\, i(\ell,t - \Delta t) - e(\ell,t - \Delta t) \qquad (4.52)$$

a qual é obtida após integração no instante Δt, da equação:

$$e(\ell,t) = r_c\, i(\ell,t) + L_c \frac{d}{dt} i(\ell,t) \qquad (4.53)$$

Combinando-se as equações (4.38) e (4.51), obtém-se:

$$e(\ell,t) = \frac{1}{1 + A_c} \{E_c(\ell) - A_c E_{2n}\} \qquad (4.54)$$

A expressão da corrente $i(\ell,t)$ necessária para o cálculo de $E_c(\ell)$ é obtida da equação (4.51):

$$i(\ell,t) = \frac{1}{r_c + R_c} \{e(\ell,t) - E_c(\ell)\} \qquad (4.55)$$

Ao fim do intervalo de sobreposição do tiristor T_1, a condição $i(\ell,t)=I_c$ passa a vigorar. A partir deste instante a tensão $e(\ell,t)$ é calculada pela equação:

$$e(\ell,t) = -Z_1\, I_c - E_{2n} \qquad (4.56)$$

obtida diretamente da equação (3.38). A forma de calcular as demais tensões permanece inalterada.

De forma análoga aos casos anteriores, a partir de $t=t_3$ é necessário voltar a calcular a tensão $e(\ell,t)$ através da expressão (4.54). À expressão (4.55) da corrente $i(\ell,t)$ deve ser somada a quantidade I_c. Após o instante $t = t_3 + \Delta t_3$ a tensão $e(\ell,t)$ volta a ser calculada através de uma expressão análoga à equação (4.56).

4.4 - Implementação do Procedimento para Cálculo das Tensões.

Conforme examinado no item 4.3, o cálculo das n+1 tensões e(jd,t) pressupõe o conhecimento de n valores de E_{2j} e n valores de E_{2j+1}. Particularmente para as posições x=0 e x=k, é necessário também que estejam disponíveis os valores de E_s e $E_r(kd)$. Como E_{2j} e E_{2j+1} são ambos funções do instante $t - \theta$ e como E_s e $E_r(kd)$ são funções do instante $t - \Delta t$, então, quando $\theta = \Delta t$, com estas 2n+2 funções do instante $t - \Delta t$ é possível calcular as n+1 tensões no instante t. Assim a cada intervalo Δt é necessário atualizar os valores de E_{2j}, E_{2j+1}, E_s e $E_r(kd)$ porque estes valores serão utilizados no cálculo das tensões no instante imediatamente seguinte. Para atualizar os valores de E_{2j} e E_{2j+1} são utilizadas as seguintes expressões desenvolvidas no Apêndice II,

$$E_{2j-1}(t) = -(1 + \frac{Z_2}{Z_1})\ e(jd,t) - \frac{Z_2}{Z_1} E_{2j}(t - \Delta t) \qquad (4.57)$$

$$E_{2(j+1)}(t) = -(1 + \frac{Z_2}{Z_1})\ e(jd,t) - \frac{Z_2}{Z_1} E_{2j+1}(t - \Delta t) \qquad (4.58)$$

Os valores de E_s e $E_r(kd)$ devem ser atualizados através das respectivas expressões, observada a condição aplicável ao caso em função da localização da locomotiva no trecho de linha.

Como os primeiros valores de tensão são calculados em $t = \Delta t$, é necessário conhecer os valores de E_{2j}, E_{2j+1}, E_s e $E_r(kd)$ no instante $t = 0$, quando tem início o processo transitório. Esta condição inicial pode ser facilmente obtida quando se admite a presença de um modo de circulação livre. Neste caso, a linha pode ser considerada em regime senoidal em frequência industrial, até o instante em que ocorre o gatilhamento de um tiristor dando início ao processo transitório. Assim sendo, considerando-se que o comprimento de onda associado a esta condição é muito maior do que o comprimento do trecho de linha (tipicamente até umas duas dezenas de milhas), pode-se admitir que o trecho todo de linha está energizado praticamente com a mesma tensão senoidal $v(t) = \sqrt{2}\ V\text{sen}(\omega t + \alpha)$. Portanto, se α é o ângulo de gatilhamento do tiristor T_1, a tensão em qualquer posição ao longo da linha em $t = 0$ é dada por $v(0) = \sqrt{2}\ V\text{sen}\ \alpha$. A corrente na linha é nula neste instante. Com isto, os valores iniciais da tensão e da corrente em qualquer posição ficam determinados e os valores de E_{2j}, E_{2j+1}, E_s e $E_r(kd)$ podem ser calculados. Se θ for um múltiplo inteiro de Δt, o cálculo de tensões no instante t, vai exigir além dos valores de E_s e $E_r(kd)$ no instante $t - \Delta t$, também os valores de E_{2j} e E_{2j+1} nos instantes $t - \Delta t$, $t - 2\Delta t$,..., $t - \theta$.

A figura 4.12 apresenta o diagrama de blocos do programa computacional através do qual foi implementada esta aplicação do algoritmo de Schnyder-Bergeron.

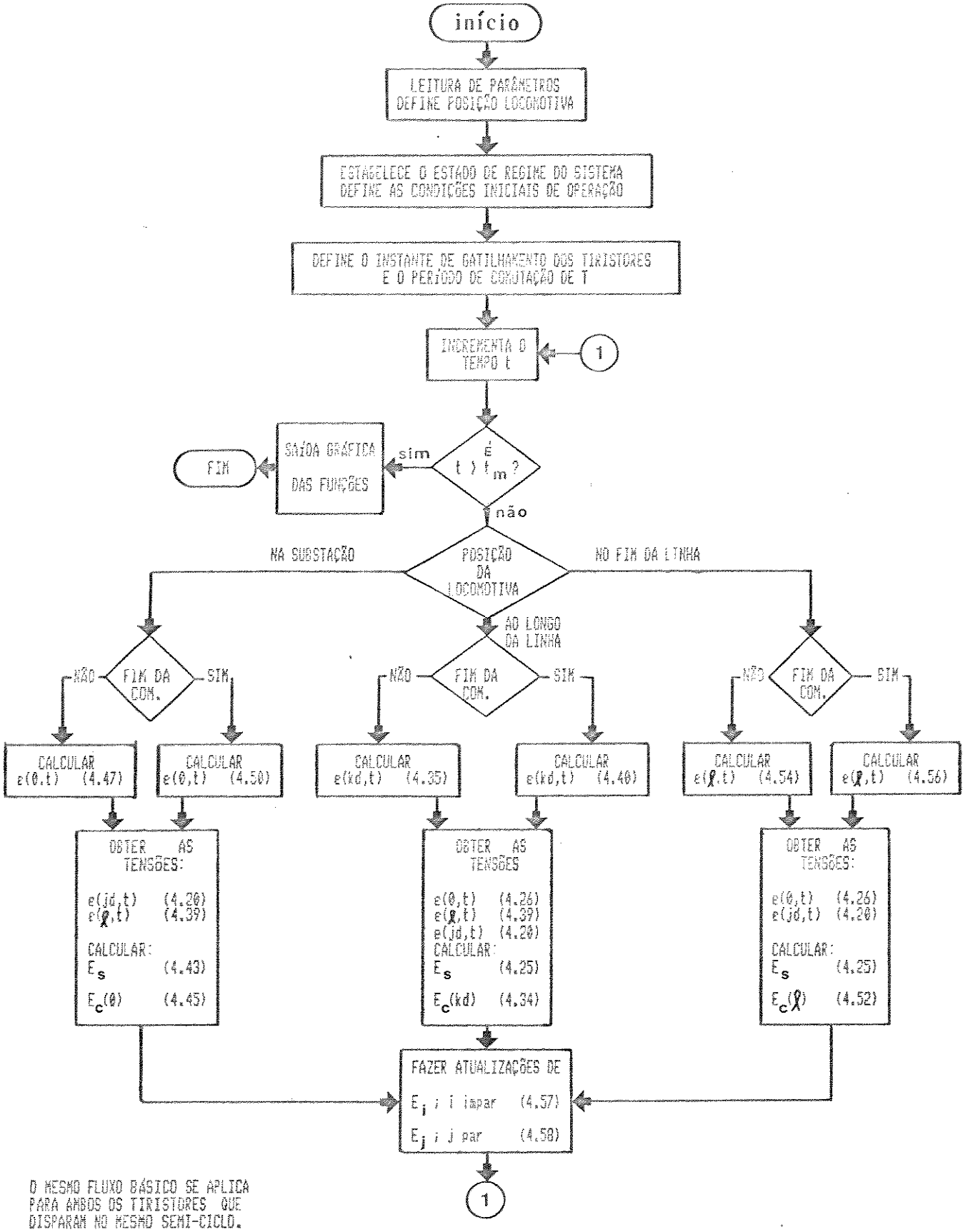


Figura 4.12: Diagrama de blocos

Conforme mencionado ao início deste capítulo, o perfil de tensões ao longo da linha pode ser calculado através de expressões analíticas. Para ilustrar esta forma de cálculo, considere-se a condição em que a locomotiva se encontra na posição mais remota da linha em relação à subestação. Para a maioria dos casos, observe-se que esta condição é particularmente crítica quanto à ocorrência de sobretensões [24]. O cálculo de tensões é iniciado em t=0, instante em que o fechamento da chave CH simula o gatilhamento do tiristor T_1, conforme indicado na figura 4.13.

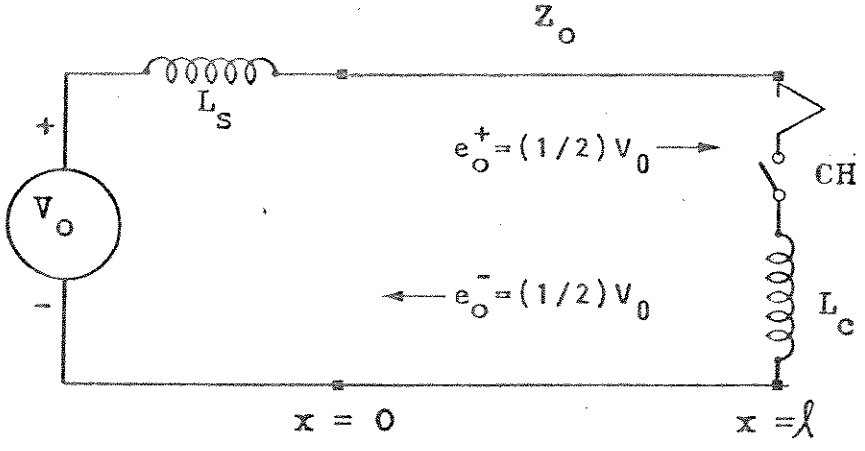


Figura 4.13: Condição inicial para gatilhamento

Supõe-se que a linha esteja em regime permanente até imediatamente antes do gatilhamento de T_1. A tensão de regime na posição $x=\ell$ é $e_o(\ell,t) = v_o(t)$. Como o trecho de linha é curto e está sendo alimentado com tensão senoidal de frequência industrial, pode-se dizer que a linha toda está excitada com a tensão $V_o(t)$.

Para poder trabalhar com o diagrama de treliças, esta situação de regime da linha pode ser colocada sob a forma de duas ondas viajantes e (incidente) e e (refletida) de modo que se verifique a relação:

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

$$e_o^+(x,t) + e_o^-(x,t) = V_o(t) \qquad (4.59)$$

em qualquer posição ao longo da linha, para $t < 0$. Como não circula corrente pela linha durante o regime permanente, resulta que:

$$e_o^+(x,t) = e_o^-(x,t) = \frac{1}{2} V_o(t) \qquad (4.60)$$

Conforme se observa na figura 4.13, no instante $t = 0$ o coeficiente $\rho_c(s)$ de reflexão da terminação $x = \ell$ passa de $\rho_c(s) = 1$ para $\rho_c(s) = (sL_c - Z_o)/(sL_c + Z_o)$ e a onda de tensão refletida por esta terminação passa a se escrever:

$$e_1^-(\ell,t) = h_c(t) * e_o^+(\ell,t) - e_o^-(\ell,t) = h_c(t) * \frac{1}{2} V_o(t) - \frac{1}{2} V_o(t) \qquad (4.61)$$

onde $h_c(t)$ é a transformada inversa de $\rho_c(s)$ e o sinal "*" indica a convolução das funções correspondentes. Se T for o tempo de percurso da linha para uma velocidade de propagação u, a onda refletida e_1^- não atingirá uma posição genérica x ao longo da linha antes do instante $t = T - x/u$. A tensão na linha será dada por:

$$e(x,t) = V_o(t) \quad ; \quad t < T - x/u$$

$$e(x,t) = e_1^-(x,t) + V_o(t) \quad ; \quad T - x/u \leqslant t < T + x/u \qquad (4.62)$$

A partir de $t = T + x/u$ será necessário considerar o efeito sobre a tensão $e(x,t)$ da onda incidente e_2^+ originada em $t = T$, na posição $x = 0$:

$$e_2^+(x,t) = e_1^-(x,t) * h_s(t) \quad ; \quad t \geqslant T + x/u \qquad (4.63)$$

em que $h_s(t)$ é a transformada inversa do coeficiente $\rho_s(s)$ de reflexão desta terminação. Neste caso, a expressão da tensão $e(x,t)$ é:

$$e(x,t) = e_1^-(x,t) + e_2^+(x,t) + V_o(t) \quad ; \quad T + \frac{x}{u} \leq t < 3T - \frac{x}{u} \qquad (4.64)$$

É facil verificar que a expressão genérica da onda refletida de tensão será dada por:

$$e_{2m+1}^-(x,t) = e_1^-(x,t) * h_s^{*m}(t) * h_c^{*m}(t) \quad ; \quad t \geq (2m+1)T - \frac{x}{u} \qquad (4.65)$$

em que m(m $\geq$ 0 e inteiro) corresponde ao número de vezes que e_1^- incidiu em ambas as terminações.

A expressão genérica para a onda incidente de tensão é:

$$e_{2n}^+(x,t) = e_1^-(x,t) * h_s^{*n}(t) * h_c^{*(n-1)}(t) \quad ; \quad t \geq (2n-1)T - \frac{x}{u} \qquad (4.66)$$

em que n(n $\geq$ 1 é inteiro) é o número de vezes que a onda e_1^- incidiu na terminação x=0.

Para ambas as expressões (4.65) e (4.66)

$$h^{*j} = \underset{1}{h} * \underset{2}{h} * \ldots * \underset{j}{h} \quad ; \quad j \geq 0 \text{ e inteiro} \qquad (4.67)$$
$$(j \text{ termos } h)$$

onde, por definição, $h^{*0} = \delta(t)$

O seguinte algoritmo serve para calcular a tensão $e(x,t)$ na posição x e no instante t genéricos:

1 - Faça N = int (t/T) ; int(a) = parte inteira de a

2 - Se N = 0, calcule $t_o = T - x/u$ e faça:

$$e(x,t) = V_o(t) \qquad ; \quad t < t_o \tag{4.68}$$

$$e(x,t) = V_o(t) + e_1^-(x,t) \quad ; \quad t \geq t_o \tag{4.69}$$

3 - Se N é par e $N \neq 0$, calcule $t = (N+1)\,T - x/u$ e faça:

$$e(x,t) = V_o(t) + \sum_{m=0}^{N/2-1} e_{2m+1}^-(x,t) + \sum_{n=1}^{N/2} e_{2n}^+(x,t) \; ; \; t < t_1 \tag{4.70}$$

$$e(x,t) = V_o(t) + \sum_{m=0}^{N/2} e_{2m+1}^-(x,t) + \sum_{n=1}^{N/2} e_{2n}^+(x,t) \; ; \; t \geq t_1 \tag{4.71}$$

4 - Se N é impar, calcule $t_2 = NT + x/u$ e faça:

$$e(x,t) = V_o(t) + \sum_{m=0}^{(\frac{N-1}{2})} e_{2m+1}^-(x,t) + \sum_{n=1}^{(\frac{N-1}{2})} e_{2n}^+(x,t) \quad ; \quad t < t_2 \tag{4.72}$$

exceto se N = 1, quando então:

$$e(x,t) = V_o(t) + e_1^-(x,t) \tag{4.73}$$

$$e(x,t) = V_o(t) + \sum_{m=0}^{\frac{N-1}{2}} e_{2m+1}^-(x,t) + \sum_{n=1}^{\frac{N+1}{2}} e_{2n}^+(x,t) \quad ; \quad t \geq t_2 \tag{4.74}$$

Antes de calcular o valor das tensões é necessário obter analiticamente uma expressão para a função:

$$h_s^{*j}(t) * h_c^{*k}(t) \tag{4.75}$$

para que possam ser calculadas as expressões de $e^{-}_{2m+1}(x,t)$ e $e^{+}_{2n}(x,t)$.

Caso a locomotiva não se encontre na terminação $x = \ell$, fica impraticável obter solução pela via analítica pelo método do diagrama de treliças. Será mais recomendável empregar um método numérico.

CAPÍTULO V

CONTROLE DE SOBRETENSÕES NA LINHA DE CONTATO

Durante a operação da locomotiva, ocorrem múltiplas reflexões de ondas viajantes de tensão, tanto nas terminações da linha de contato, quanto na própria locomotiva. Especialmente durante a fase f_1 da aceleração, as magnitudes dos picos de tensão que a catenária pode apresentar estão ligadas a estas reflexões porque os parâmetros existentes nestas terminações influem nas mesmas. Nas terminações que permanecem em circuito aberto as reflexões são completas. Observando-se o esquema apresentado na figura 2.1, verifica-se que cada subestação SE alimenta dois trechos de linha de contato. Estes não podem ser interligados porque as tensões que alimentam linhas distintas não tem a mesma fase, em razão da característica do transformador da subestação. Segue-se que as terminações finais da linha de contato permanecem em circuito aberto, dando origem a reflexões que tem muita influência sobre o aparecimento de sobretensões.

A locomotiva constitui a parte do sistema a qual é mais sensível aos picos de tensão. Porisso torna-se interessante levantar as circunstâncias em que são observadas as condições mais críticas para a mesma. O programa digital desenvolvido no Capítulo IV, pela sua flexibilidade já mencionada, permite realizar este estudo.

Entre outras medidas que podem ser tomadas, a instalação de filtros constitui a solução mais indicada para se promover o controle do nível de tensão da linha.

Neste capítulo é apresentada uma extensão do processo de cálculo digital de tensões, para a situação em que

existe um filtro instalado em alguma posição ao longo da linha. Este estudo foi realizado para um filtro do tipo RC, o qual é indicado para muitos casos. Nada impede, no entanto, que possa ser, de forma análoga, aplicado para o caso em que outros tipos de filtros tenham sido recomendados.

5.1 - Redução de Sobretensões Via Instalação de Filtros

Um dos parâmetros de projeto para o sistema de alimentação de tração, e para a própria locomotiva, é o nível de tensão a que os mesmos possam vir a estar eventualmente submetidos. Neste sentido, o controle de sobretensões consiste em se definir uma magnitude máxima aceitável para a tensão da linha. Através da instalação de filtros, torna-se possível adequar o nível de tensão à magnitude desejada.

Em princípio, filtros podem ser instalados tanto na locomotiva quanto na linha de contato. A experiência já adquirida nesta área descarta a instalação de filtros a bordo da locomotiva [38], recomendando-se sua colocação na linha de contato. A propósito, considere-se a figura 5.1, na qual a locomotiva ocupa uma posição genérica x:

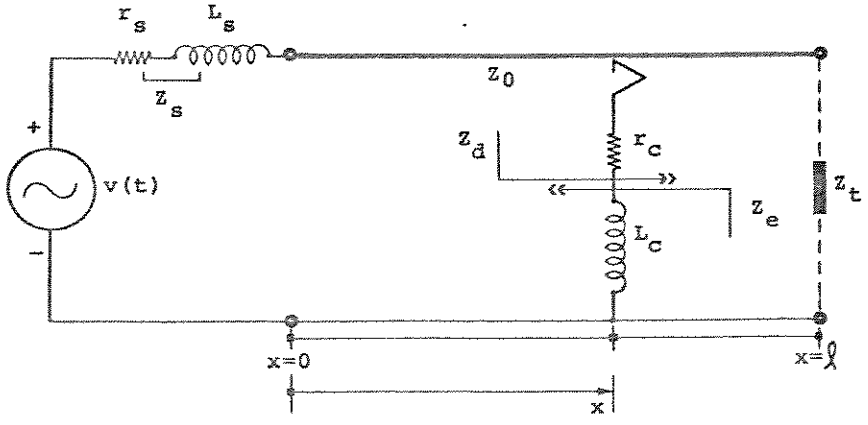


Figura 5.1: Impedâncias em relação à locomotiva

A impedância Z_d, correspondente à parte do sistema que está situada à direita da locomotiva, é dada por:

$$Z_d(x) = \frac{Z_t + Z_o \tanh \gamma(\ell - x)}{1 + Z_t/Z_o \tanh \gamma(\ell - x)} \qquad (5.1)$$

Como a terminação final da linha, via de regra, está em circuito aberto, pode-se reescrever a expressão (5.1), com $Z_t \to \infty$:

$$Z_d(x) = \frac{1}{1/Z_o \tanh \gamma(\ell - x)} \qquad (5.2)$$

A impedância Z_e, correspondente à porção do sistema situada à esquerda da locomotiva, é dada pela expressão:

$$Z_e(x) = \frac{\cosh \gamma x + Z_o/Z_s \operatorname{senh} \gamma x}{1/Z_e \cosh \gamma x + 1/Z_o \operatorname{senh} \gamma x} \qquad (5.3)$$

Tanto as impedâncias Z_d e Z_e, quanto a função γ de propagação, são funções da frequência.

Se a locomotiva for considerada como uma fonte de harmônicos de corrente, e se, portanto, I_{cn} for o harmônico de ordem n da corrente de pantógrafo, a tensão E_{cn} correspondente será dada por:

$$E_{cn} = \frac{I_{cn}}{Y_{dn} + Y_{en}} \qquad (5.4)$$

em que Y_{dn} e Y_{en} são admitâncias correspondentes às impedâncias Z_d e Z_e, respectivamente, para o n-ésimo harmônico de corrente.

Para valores de frequência próximos da frequência de ressonância do sistema, a soma de admitâncias do denominador da expressão (5.4) é mínima, e a tensão E_{cn} é máxima.

A magnitude da tensão E_{cn} pode ser reduzida através da instalação de um filtro que faça variar o valor de Y_{dn}

(ou de Y_{en}) na frequência de ressonância.

Estudos realizados acerca deste tópico [28] indicam que não existe a mesma facilidade para se conseguir variações nestas duas admitâncias. Em virtude da característica do transformador da subestação, apenas a admitância Y_{dn} pode ser modificada com facilidade, através da instalação de filtros. Neste caso tem sido recomendada a instalação de um filtro na terminação final da linha que está em circuito aberto.

O tipo de filtro que pode ser usado depende muito da magnitude da frequência de ressonância do sistema.

5.2 - Cálculo da frequência de ressonância

As sobretensões que realmente apresentam interesse são aquelas que ocorrem no sistema, na frequência de ressonância ou nas frequências que lhe são mais próximas. Por esta razão, torna-se interessante poder avaliar a magnitude desta frequência em função dos parâmetros do sistema. Para efetuar este cálculo, as seguintes admitâncias podem ser obtidas diretamente das expressões (5.2) e (5.3):

$$Y_d = j \frac{1}{Z_o} \operatorname{tg} \beta(\ell - x) \tag{5.5}$$

$$Y_e = \frac{1}{Z_o} \frac{Z_o \cos \beta x + jZ_s \operatorname{sen} \beta x}{Z_s \cos \beta x + jZ_o \operatorname{sen} \beta x} \tag{5.6}$$

onde $\beta = \omega \sqrt{LC}$ é a função de fase (parte imaginária da função de propagação γ) e a linha é considerada sem perdas. Sendo f_r a frequência de ressonância do sistema para esta frequência, a seguinte relação pode ser escrita:

$$Y_d + Y_e = 0 \qquad (5.7)$$

substituindo-se, na expressão (5.7), os valores de Y_d e Y_e e efetuando-se as operações indicadas, obtém-se:

$$\text{tg } \omega_r\sqrt{LC}\,\ell = \frac{1}{L_s}\sqrt{\frac{L}{C}}\,\frac{1}{\omega_r} \qquad (5.8)$$

em que se considerou $Z_s = j\omega L_s$ e onde ω_r é a frequência angular de ressonância.

Obtém-se o valor de f_r através da solução da equação (5.8).

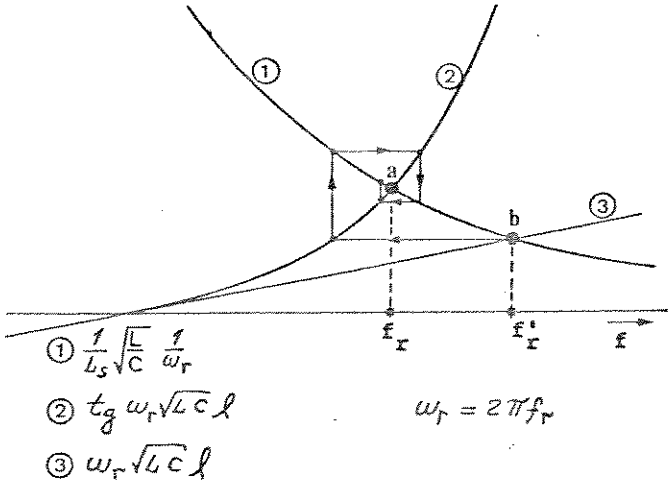


Figura 5.2: Cálculo da frequência de ressonância

A figura 5.2 permite visualizar a solução da equação (5.8). Nesta figura, o ponto **a** representa esta solução. Observe-se que quando $\omega_r\sqrt{LC}\,\ell << 1$, a aproximação $\text{tg } \omega_r\sqrt{LC}\,\ell \simeq \omega_r\sqrt{LC}\,\ell$ pode ser usada. Neste caso, a equação (5.8) passa a se escrever:

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L_s (C\ell)} \qquad (5.9)$$

de onde se obtém:

$$f_r' = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_s C_t}} \qquad (5.10)$$

Da equação (5.10) obtém-se um valor f_r' aproximado da frequência de ressonância do sistema. Esta solução aproximada está representada na figura 5.2 através do ponto b e corresponde a considerar concentrada (junto à subestação), em um único parâmetro $C_t = C\ell$, a capacitância C que a linha tem distribuida ao longo de seu comprimento.

O valor de frequência calculado na equação (5.10) não é o verdadeiro valor da frequência de ressonância. Mas é um bom valor inicial para o cálculo desta frequência, através de um método de relaxação que seja implementado com o uso da expressão (5.8).

5.3 - Cálculo do Perfil de Tensões na Presença de Filtros

Sabe-se que a instalação de um filtro na linha de contato produz alterações no perfil de tensões que se observa ao longo da mesma. Em virtude de a terminação final da linha permanecer em circuito aberto, tem sido recomendada a instalação de filtros exatamente nesta posição. Afinal, as reflexões mais completas ocorrem nesta terminação.

Nos desenvolvimentos que vem a seguir, o método de Schnyder-Bergeron será aplicado a uma linha equipada com filtro. Para permitir ampla flexibilidade na investigação, considera-se que o filtro pode ser colocado em qualquer posição (assim como a própria locomotiva) ao longo da linha de contato. Referência será feita, sempre que necessário, ao Capítulo IV, chamando-se sempre a atenção para as modificações que a forma de cálculo das tensões precisa sofrer, caso se considere a instalação de fil-

tros. Na posição em que o filtro estiver instalado, a forma de cálculo da tensão terá de ser revista.

Nos esquemas que vem apresentados a seguir, neste item, será utilizada a notação apresentada na figura 5.3.

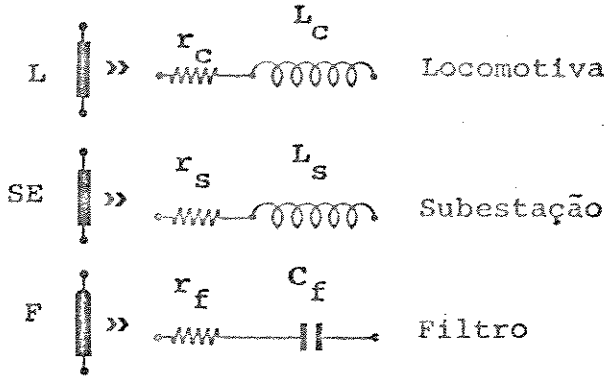


Figura 5.3: Notação para os desenvolvimentos do item 5.3

Considere-se inicialmente, a condição C_1 (locomotiva situada em $x = kd$, $k \neq 0$ e $k \neq n$). Dentro desta condição, os seguintes casos serão considerados, quanto à localização do filtro:

F_1 - (a): Filtro instalado junto à subestação (figura 5.4)

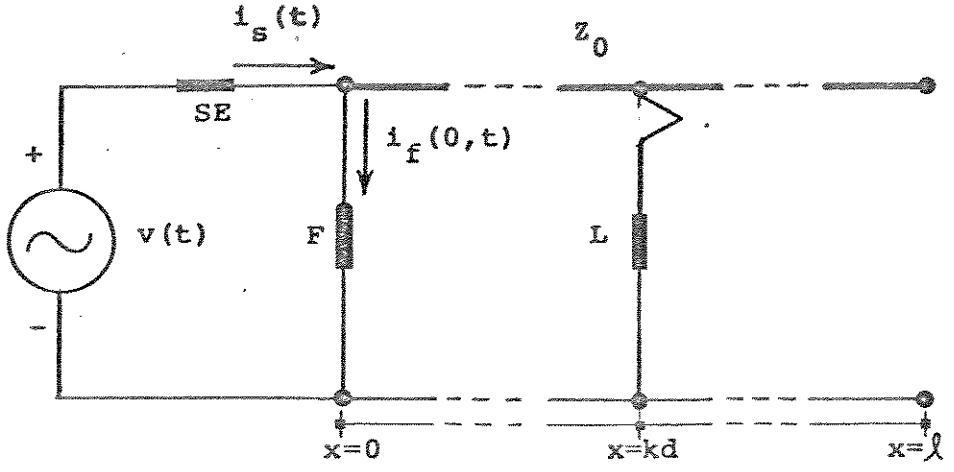


Figura 5.4: Filtro instalado junto à subestação

Neste caso, as seguintes equações podem ser escri-

tas:

$$e(0,t) = Z_1\{i_s(t) - i_f(0,t)\} - E_1 \qquad \text{(linha)} \qquad (5.11)$$

$$v(t) - e(0,t) = r_s\, i_s(t) + L_s \frac{d}{dt}\, i_s(t) \qquad \text{(subestação)} \qquad (5.12)$$

$$e(0,t) = r_f\, i_f(0,t) + e_c \qquad \text{(filtro)} \qquad (5.13)$$

$$i_f(0,t) = C_f \frac{d}{dt}\, e_c \qquad (e_c\text{: tensão no capacitor}) \qquad (5.14)$$

As equações (5.13) e (5.14) podem ser combinadas e a equação resultante pode ser integrada no intervalo Δt. Desta operação vai resultar a seguinte equação (Apêndice III):

$$e(0,t) = (r_f + R_f)\, i_f(0,t) + E_f(0) \qquad (5.15)$$

onde

$$R_f = \frac{\Delta t}{2C_f} \qquad (5.16)$$

$E_f(0)$ deve ser obtida através da expressão geral:

$$E_f(jd) = e(jd, t - \Delta t) + (R_f - r_f)\, i_f(jd, t - \Delta t) \qquad (5.17)$$

em que j é um inteiro que varia desde j = 0 até j = n.

Da integração da equação (5.12) no intervalo Δt, resulta:

$$e(0,t) = v(t) - (r_s + R_s)\, i_s(t) - E_s \qquad (5.18)$$

onde

$$E_s = (r_s - R_s)\, i_s(t - \Delta t) - v(t - \Delta t) + e(0, t - \Delta t) \qquad (5.19)$$

Agora os valores de i_f e de i_s podem ser tirados das equações (5.15) e (5.18) respectivamente, e substituídos na equação (5.11). Obtém-se então a expressão:

$$e(0,t) = \frac{1}{A_f + A_s + A_f A_s} \{ A_f [v(t) - E_s] + A_s [E_f(0) - A_f E_1] \} \qquad (5.20)$$

onde

$$A_f = \frac{r_f + R_f}{Z_1} \qquad (5.21)$$

Portanto, se houver um filtro RC instalado junto à subestação, a tensão neste ponto deixa de ser calculada pela expressão (4.26), passando a ser calculada através da equação (5.20).

F_1 - (b): Filtro instalado em x = pd, p inteiro não coincidente com 0, n ou k (figura 5.5)

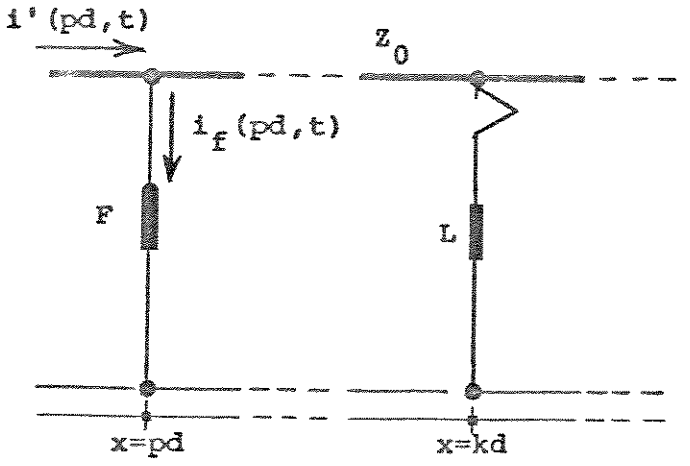


Figura 5.5: Filtro ao longo da linha

As seguintes equações podem ser escritas:

$$e(pd,t) = Z_1\{i'(pd,t) - i_f(pd,t)\} - E_{2p+1} \qquad (5.22)$$

(linha)

$$e(pd,t) = -Z_1\, i'(pd,t) - E_{2p} \qquad (5.23)$$

$$e(pd,t) = (r_f + R_f)\, i_f(pd,t) + E_f(pd) \qquad \text{(filtro)} \qquad (5.24)$$

Substituindo-se na equação (5.22) os valores de $i'(pd,t)$ e $i_f(pd,t)$, resulta:

$$e(pd,t) = \frac{1}{1 + 2A_f}\{E_f(pd) - A_f(E_{2p} + E_{2p+1})\} \qquad (5.25)$$

Se não houvesse um filtro instalado em $x = pd$, a tensão nesta posição seria simplesmente calculada através da expressão (4.20).

F_1 - (c): Filtro em $x = kd$ (locomotiva) [figura 5.6]

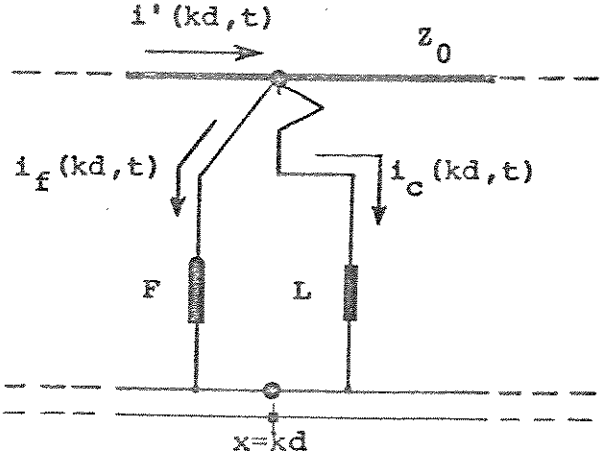


Figura 5.6: Filtro e locomotiva na mesma posição

Neste caso, as seguintes equações podem ser escritas:

$$e(kd,t) = Z_1\{i'(kd,t) - i_f(kd,t) - i_c(kd,t)\} - E_{2k+1} \qquad (5.26)$$

(linha)

$$e(kd,t) = -Z_1\, i'(kd,t) - E_{2k} \qquad (5.27)$$

$$e(kd,t) = (r_f + R_f)\, i_f(kd,t) + E_f(kd) \qquad \text{(filtro)} \qquad (5.28)$$

$$e(kd,t) = (r_c + R_c)\, i_c(kd,t) + E_c(kd) \qquad \text{(locomotiva)} \qquad (5.29)$$

com

$$E_c(kd) = (r_c - R_c)\, i_c(kd,t - \Delta t) - e(kd,t - \Delta t) \qquad (5.30)$$

Da substituição dos valores de corrente das equações (5.27) a (5.29) na equação (5.26); vem:

$$e(kd,t) = \frac{1}{A_c + A_f + 2A_cA_f}\{A_cE_f(kd) + A_f[E_c(kd) - A_c(E_{2k} + E_{2k+1})]\} \qquad (5.31)$$

A equação (5.31) corresponde à equação (4.35)

F_1 - (d): Filtro instalado em x = nd (figura 5.7)

As seguintes equações podem ser escritas para este caso:

$$e(nd,t) = -Z_1\, i(nd,t) - E_{2n} \qquad \text{(linha)} \qquad (5.32)$$

$$e(nd,t) = (r_f + R_f)\, i_f(nd,t) + E_f(nd) \qquad \text{(filtro)} \qquad (5.33)$$

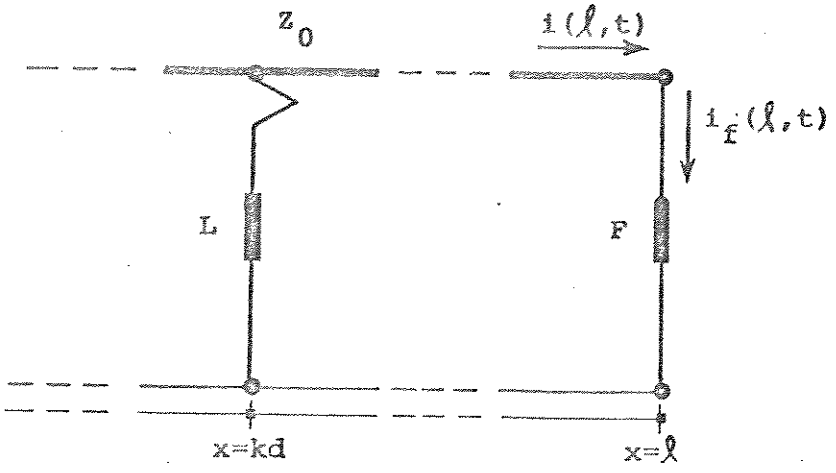


Figura 5.7: Filtro no final do trecho de linha

Combinadas as equações, resulta:

$$e(nd,t) = \frac{1}{1 + A_f} \{ E_f(nd) - A_f \, E_{2n} \} \qquad (5.34)$$

Esta equação substitui a equação (4.39).

Considere-se agora a condição C_2 (locomotiva na subestação). Dentro desta condição, apenas o caso em que o filtro também esteja em x = 0 precisa ser examinado (figura 5.8)

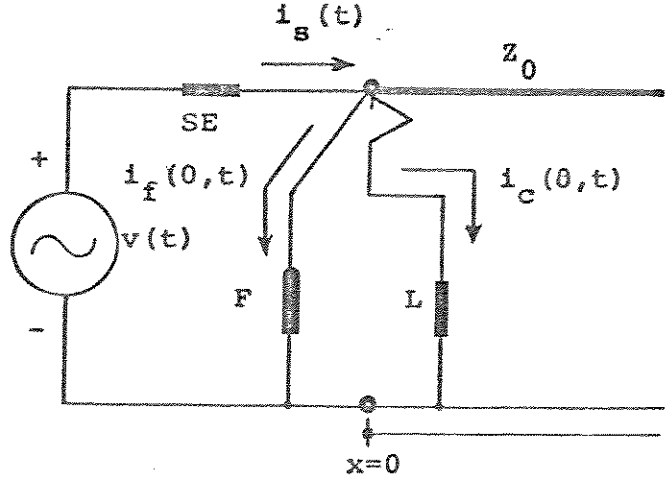


Figura 5.8: Filtro e locomotiva situados em x = 0

As seguintes equações podem ser escritas:

$$e(0,t) = Z_1\{i_s(t) - i_f(0,t) - i_c(0,t)\} - E_1 \quad \text{(linha)} \qquad (5.35)$$

$$e(0,t) = (r_c + R_c)\, i_c(0,t) + E_c(0) \quad \text{(locomotiva)} \qquad (5.36)$$

além das equações (5.15) e (5.18), respectivamente para o filtro e para a subestação.

Combinadas todas estas equações, finalmente resulta:

$$e(0,t) = \frac{1}{A_cA_f + A_cA_s + A_fA_s + A_cA_fA_s}\{A_cA_f[v(t) - E_s] +$$

$$+ A_fA_sE_c(0) + A_c[A_sE_f(0) - A_fA_sE_1]\} \qquad (5.37)$$

A equação (5.37) substitui a equação (4.47). Caso o filtro não esteja na subestação, este só pode estar ao longo da linha ou na sua terminação final. Estes dois casos já foram analisados no item anterior (casos F_1 - (b) e F_1 - (d), respectivamente)

Considerando-se, por fim, o caso C_3 (locomotiva no final do trecho), apenas o caso em que o filtro também esteja no final do trecho precisa ser considerado (figura 5.9).

Neste caso, além das equações (5.32) (para a linha) e (5.33) (para o filtro), a seguinte equação pode ser escrita, para a locomotiva:

$$e(nd,t) = (r_c + R_c)\, i_c(nd,t) + E_c(nd) \qquad (5.38)$$

Feitas as devidas combinações de equações, resulta:

$$e(nd,t) = \frac{1}{A_c + A_f + A_c A_f} \{A_c E_f(nd) + A_f [E_c(nd) - A_c E_{2n}]\} \qquad (5.39)$$

A equação (5.39) substitui a equação (4.54). Os casos em que o filtro não esteja junto à locomotiva já foram examinados anteriormente.

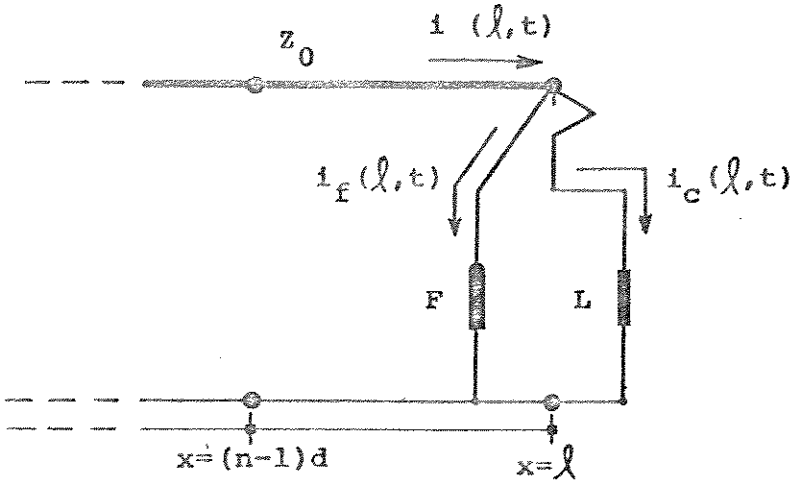


Figura 5.9: Filtro e locomotiva situados no fim do trecho

5.4 - Implementação do Procedimento de Cálculo das Tensões

O diagrama apresentado na figura 4.12 continua sendo aplicável, com algumas ligeiras modificações. As expressões de cálculo de tensões terão de ser modificadas em todas as posições em que há filtro instalado. A magnitude de E_f (equação 5.17) precisa ser calculada a cada intervalo de integração para que possa ser utilizada no cálculo da tensão no intervalo seguinte.

O programa computacional desenvolvido na Capítulo IV foi devidamente modificado permitindo-se inclusive promover variações nas magnitudes dos parâmetros do filtro.

CAPÍTULO VI

SIMULADOR ANALÓGICO PARA O SISTEMA DE TRAÇÃO

Conforme se observou no capítulo I, existe no Brasil uma determinação no sentido de se partir para a eletrificação de algumas ferrovias com corrente alternada monofásica de alta tensão e frequência industrial. Esta decisão vem atender a um imperativo de ordem técnico-econômica o qual vem norteando o desenvolvimento deste tipo de eletrificação ao redor do mundo. Uma série de contratempos que o país vem enfretando, já a algum tempo, está determinando atrasos importantes nos cronogramas de implantação de alguns projetos cuja execução já estava, inclusive, decidida. Em consequência destas atribulações, o país não pode contar hoje com nenhuma ferrovia deste tipo que esteja realmente implantada. Existe, no entanto, a expectativa, aliás muito promissora, de que os trabalhos venham a ser retomados em futuro próximo (ao menos na Ferrovia do Aço, como se noticia).

É precisamente neste contexto, em que nenhum sistema real brasileiro está disponível, que se coloca a importância de se poder dispor de um simulador analógico para o sistema de tração. Nestas condições, a análise não poderia estar resumida apenas à investigação realizada pela via do cálculo digital. Assim, decidiu-se pela implementação de um modelo analógico que funcionasse como simulador do sistema de tração. Suas características são discutidas neste capítulo.

6.1 - Potencialidade do Simulador Analógico

Construido com base em parâmetros típicos de sistemas de tração, do tipo que vem sendo considerado neste trabalho, este simulador analógico destina-se primordialmente ao estudo do fenômeno de sobretensões que podem ocorrer na linha de

contato. Para este tipo de investigação, o simulador permite que sejam feitas observações ao longo da linha artificial construída para simular a linha de contato.

As posições, ao longo da linha de contato em que são observadas as tensões mais elevadas podem ser facilmente identificadas. Naturalmente as tensões máximas observadas dependem dos ângulos de gatilhamento dos tiristores, para uma dada localização que se assuma para a locomotiva. Através do simulador, os ângulos de gatilhamento podem ser variados e as diversas posições da locomotiva podem ser representadas. Investigações nesta área, que envolvam a variação de magnitudes de parâmetros, também podem ser realizadas.

Um outro aspecto interessante na investigação de sobretensões refere-se à alocação de filtros ao longo da linha de contato. Tanto a sua localização quanto, a variação de seus parâmetros podem ser facilmente simulados.

Como as sobretensões observadas na linha de contato tem origem, em última análise, no processo de chaveamento dos tiristores das pontes retificadoras, uma outra investigação interessante que pode ser conduzida através do simulador refere se ao tipo de construção de transformador de locomotiva. Pode ser interessante avaliar as condições de projeto que permitam minimizar a passagem destes efeitos de chaveamento para a linha de contato.

Fora do campo específico das investigações de sobretensões, o simulador apresenta ainda muitas possibilidades de aplicação. Entre outras, podem ser citadas as seguintes:

- subsidiar o projeto do reator de alisamento,
- estudo da influência da magnitude da reatância de dispersão do transformador da locomotiva sobre a característica de comutação dos tiristores,
- estudo de aspectos ligados à proteção dos semicondutores das pontes retificadoras da locomotiva,
- estudo da interferência eletromagnética produzida pelo sistema

de tração.

Algum trabalho foi desenvolvido em um ou outro destes itens. Os resultados serão apresentados ao longo do capítulo. Ao que se sabe, não existe hoje no Brasil um simulador deste tipo que esteja em operação.

6.2 - Implementação do Simulador Analógico

O objetivo desta parte do trabalho consiste em desenvolver e implementar um simulador analógico para o sistema de tração, com o qual seja possível efetuar uma série de avaliações, de caráter primordialmente qualitativo, acerca do comportamento do mesmo. A figura 6.1 apresenta os componentes do sistema de tração que precisam ser representados em um modelo analógico que seja útil inclusive para o estudo prático dos transitórios que ocorrem na linha de alimentação.

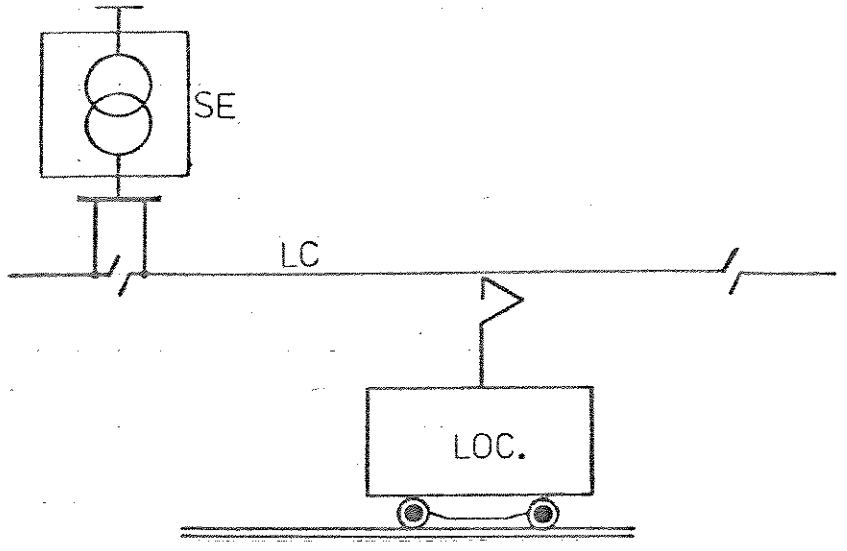


Figura 6.1: Esquema para o modelo analógico

A subestação SE e a linha de contato LC formam o sistema de alimentação de tração o qual precisa ser representado de acordo com os objetivos da análise a ser efetuada. A locomotiva, em cujas pontes retificadoras tem origem os transitórios observados na linha, também precisa ser representada.

O modelo a ser implementado baseia-se em parâmetros reais de um sistema de tração operando em uma dada condição. Para se chegar a uma representação analógica em escala reduzida, o sistema original será inicialmente simplificado em sua configuração e, em seguida, serão escalonados os valores dos parâmetros e arbitradas, segundo a conveniência, as magnitudes de tensões e de correntes.

6.2.1 - Configuração e Parâmetros dos Sistemas a serem Representados

Com relação ao sistema de alimentação de tração, constituem parâmetros importantes da subestação a indutância de dispersão e a resistência ôhmica do transformador da mesma. A indutância está relacionada com a frequência de ressonância deste sistema e a resistência ôhmica está ligada à característica de atenuação dos transitórios que ocorrerem no mesmo. Embora a magnitude da indutância de dispersão deste transformador seja razoavelmente constante com a frequência, sua influência sobre a frequência de ressonância do sistema exige que seu valor seja representado com cuidado no simulador. Quanto à resistência, esta apresenta uma variação com a frequência que não pode ser desprezada nos estudos que envolvem efeitos transitórios. O fabricante do transformador deve poder fornecer dados sobre esta variação. No sistema original em que se baseia o modelo, a subestação pode ser representada através de seu transformador cuja potência aparente típica é da ordem de 10 MVA e cuja reatância de dispersão correspondente é de 8,5%. No simulador que está sendo descrito, a variação com a frequência da resistência ôhmica deste transformador não está sendo considerada em virtude da indisponibilidade de outros dados sobre o transformador da subestação.

Quanto à linha de alimentação, existem muitas configurações diferentes que podem ser utilizadas. Dependendo da localização da ferrovia, o retorno precisa ser feito através de transformadores ("booster transformers"). A resistência ôhmica série da linha apresenta variação com a frequência mas não tem

influência importante sobre as características de atenuação de fenômenos transitórios na frequência de ressonância do sistema. Já se sabe que o cálculo desta frequência não depende do valor da indutância da linha. À capacitância "shunt" e o comprimento do trecho tem influência importante sobre o valor da frequência de ressonância.

Para a representação da linha de alimentação da locomotiva, no simulador analógico, foi escolhido um trecho simples, sem retorno através de transformadores e cujos parâmetros [1], para um dado trecho de 20 milhas de comprimento, tem os seguintes valores:

- impedância série da linha : $15 \angle 70^{\circ}\,\Omega$ (0,47Ω/km)
- capacitância "shunt" : 1μF (31nF/km)

Com relação à locomotiva, a figura 6.2 apresenta a configuração das partes essenciais dos seus circuitos de potência, omitindo outros pormenores. Observe-se que este tipo de locomotiva possui dois conjuntos de enrolamentos de secundário, cada um alimentando dois dos quatro conjuntos de pontes retificadoras que acionam quatro motores que operam com excitação independente.

Existem muitos tipos diferentes de locomotivas que operam em linhas alimentadas com corrente alternada de frequência industrial. Foi escolhido o tipo apresentado na figura 6.2 cujos parâmetros estavam disponíveis.

Os valores dos diversos parâmetros da locomotiva são [39]:

(a) Transformador da locomotiva

- potência	2600 kVA
- relação de tensões	25000 V: 4 x 744 V
- resistência ôhmica (primário)	0,98Ω
- resistência ôhmica (cada secundário)	0,0031Ω
- reatância de dispersão	15,39%

(b) Motor de tração

- resistência ôhmica da armadura 0,0225Ω
- indutância da armadura 0,9 mH

(c) Reator de alisamento

- resistência ôhmica 0,002Ω
- indutância 5,0 mH

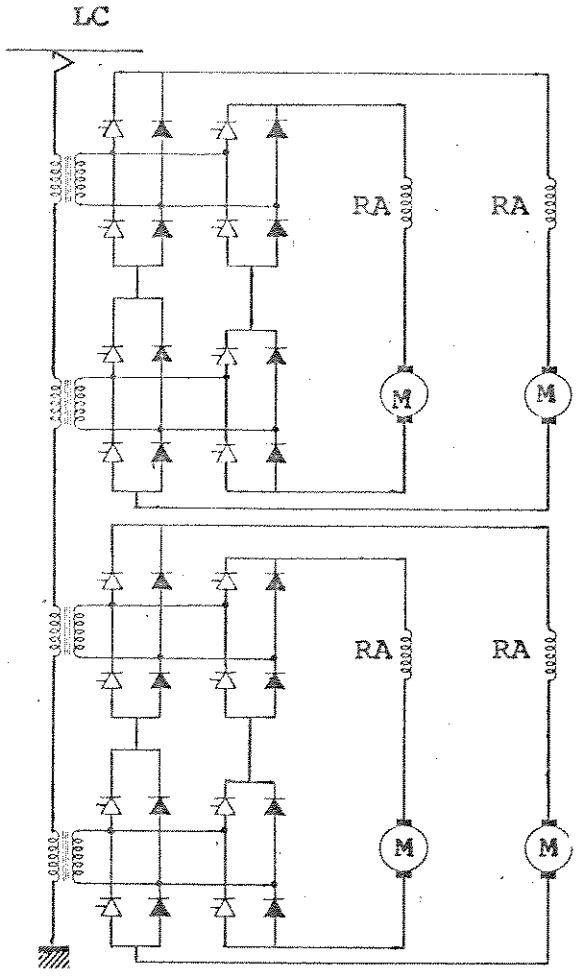


Figura 6.2: Configuração básica dos circuitos de potência da locomotiva

As condições de operação consideradas são as seguintes:

- durante a fase de aceleração cada motor de tração opera com 2000 A e a tensão máxima que pode

ser aplicada ao circuito de armadura (incluindo o reator de alisamento) é 1340 V.

- cada par de enrolamento do secundário do transformador opera com 744 V e 4000 A

6.2.2 - Configuração do Sistema com Parâmetros Escalonados

Antes de se chegar a uma representação do circuito de potência da locomotiva com parâmetros escalonados, é necessário que seja feita alguma simplificação no esquema apresentado na figura 6.2 procurando reduzí-lo ao estritamente fundamental em termos de circuito de potência.

Esta figura representa uma locomotiva equipada com quatro pontes duplas, cada uma alimentando um motor de tração. As duas pontes duplas da parte superior da figura 6.2 podem ser transformadas em uma única ponte dupla equivalente, alimentando um único motor de tração também equivalente. O mesmo procedimento pode ser aplicado às duas pontes da parte inferior da figura. Os dois conjuntos equivalentes assim obtidos podem ainda ser combinados em um único, conforme apresentado na figura 6.3.

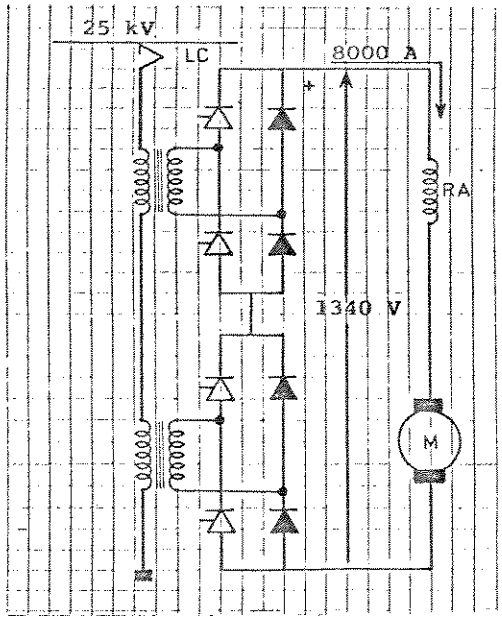


Figura 6.3: Configuração reduzida do circuito da locomotiva

A figura 6.3 representa basicamente o mesmo esquema da figura 6.2 porque reduz a locomotiva a uma unidade fundamental de comando dos motores, constituida de um único conjunto de pontes retificadoras operando em sequência.

Para que haja correspondência entre as figuras 6.2 e 6.3, os parâmetros de resistência ôhmica e de reatância do secundário do transformador da locomotiva devem ficar, em virtude da redução, com seus valores reduzidos à metade dos valores correspondentes anteriormente mencionados. Cada enrolamento do secundário passa a operar com 8000 A, mas a tensão de saída continua em 744 V. O único motor e o único reator de alisamento a que se resume a figura 6.3 devem ter os valores de seus parâmetros de resistência ôhmica e de indutância reduzidos a 25% de seus valores correspondentes já mencionados acima. Este motor agora opera com 1340 V e 8000 A.

Finalmente, os parâmetros do esquema apresentado na figura 6.3 foram todos escalonados de forma a obter-se uma representação do circuito de potência da locomotiva, em escala reduzida, mas que mantivesse a mesma configuração do esquema da figura 6.3. A figura 6.4 apresenta o resultado obtido:

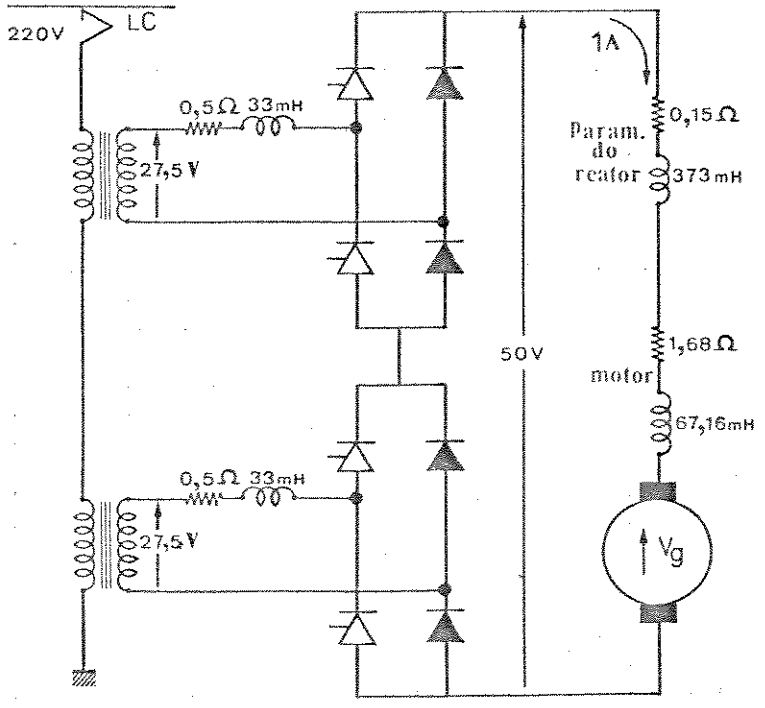


Figura 6.4: Configuração com parâmetros escalonados

Para realizar o escalonamento de parâmetros, resolveu-se escolher a magnitude de 220 V para a tensão aplicada à locomotiva, em correspondência aos 25000 V do sistema original. Para o motor de tração adotou-se a intensidade de 1A em correspondência à corrente do motor no sistema original. Cada um dos enrolamentos do secundário do transformador da locomotiva pode desenvolver entre 25 e 32,5 V mas opera em 27,5 V para dar cerca de 50 V no motor, em correspondência aos 1340 V. Os cálculos efetuados, para a locomotiva, vem indicados a seguir:

- transformador da locomotiva

  De acordo com a figura 6.3, a impedância de base para o cálculo de parâmetros em pu, neste sistema já reduzido, é dada por 744 V/8000 A = 0,093 Ω. A impedância equivalente para o modelo em escala reduzida (figura 6.4) é dada por 30 V/1 A = 30 Ω. Assim, a resistência ôhmica e a indutância de dispersão do enrolamento secundário deste transformador são respectivamente dadas por:

  (30/0,093) 0,0031/2 = 0,5Ω e
  (30/0,093) 0,206 mH/2 = 33 mH

- circuito de armadura do motor de tração

  Para o motor de tração e o reator de alisamento, a impedância de base para cálculo de parâmetros é 1340 V/8000 A = 0,1675Ω, no sistema já reduzido da figura 6.3. No modelo em escala, a impedância correspondente é 50 V/1 A = 50 Ω. Portanto, a resistência ôhmica do enrolamento de armadura do motor, e a correspondente indutância, são dadas por:

  (50/0,1675) 0,0225/4 = 1,68Ω
  (50/0,1675) 0,9 mH/4 = 67,16 mH

  Os parâmetros correspondentes do reator de alisamento são:

  (50/0,1675) 0,002/4 = 0,15Ω
  (50/0,1675) 5 mH/4 = 373 mH

Então, o circuito de armadura tem um total de 1,83Ω e cerca de 440 mH.

Assim, os valores dos parâmetros de indutância e de resistência ôhmica da locomotiva puderam ser obtidos a partir dos parâmetros correspondentes dos esquemas anteriores, com o critério de que fossem mantidos os mesmos valores percentuais nos dois casos.

6.2.3 - Modelamento da Linha de Transmissão

No simulador analógico, o qual é um modelo em escala reduzida do sistema real, a linha de contato está representada através de uma linha artificial construida com um certo número de estrutura (como aquelas apresentadas na figura 6.5) conectadas em cascata.

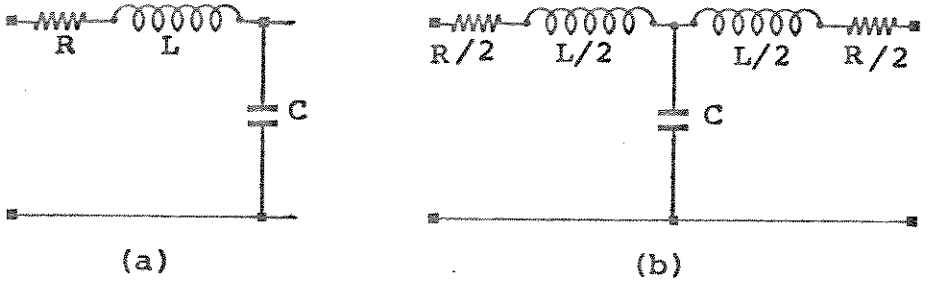


Figura 6.5: Módulos básicos para representação da linha

Para cada kilômetro de linha no sistema original há R = 0,16 Ω ; L = 1,4 mH e C = 31 nF. De acordo com a figura 6.2, quando os motores estão operando com plena carga (2000 A), circula pela linha de contato uma corrente de 2 (744/25000)4000 = 476 A. Para a obtenção de parâmetros em pu neste sistema, pode ser usada uma base de impedância dada por 25000 V/476 A = 52,2 Ω

No modelo em escala reduzida, a corrente na linha

de alimentação é 2 (30/220) 1 = 273 mA, nas condições de plena carga. Então, uma base de impedância de 220 V/273 mA = 806 Ω pode ser utilizada.

Consequentemente, as magnitudes de resistência ôhmica, indutância e capacitância, no modelo em escala, são dadas por:

$$R = 0{,}16\ (806/52{,}5) = 2{,}46\ \Omega/km$$
$$L = 1{,}4\ mH\ (806/52{,}5) = 21{,}5\ mH/km$$
$$C = 31\ nF\ (52{,}5/806) = 2\ nF/km$$

O trecho de linha que está sendo representado tem 20 milhas (cerca de 32 km). Entendeu-se razoável representar esta linha através de 8 módulos ligados em cascata. Assim, cada um destes segmentos tem 9,8 Ω ; 86 mH e 8 nF, correspondendo a 4 km de linha. Para representar a linha, foram construidas 16 bobinas com 43 mH e 0,4 Ω cada uma. Para permitir uma ampla variação do fator Q de qualidade, estas bobinas (que possuem núcleo de ferrite) tem um resistor colocado em paralelo com seus terminais. Assim, situações diferentes com relação à atenuação podem ser simuladas.

O esquema da linha é mostrado na figura 6.6

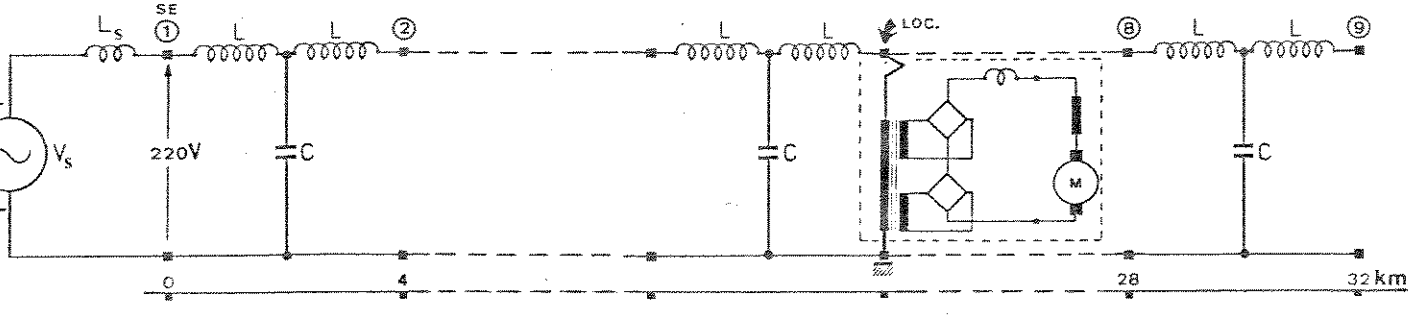


Figura 6.6: Modelo da linha de alimentação

Na figura 6.6 os valores de parâmetros de linha são: L = 43 mH e C = 8 nF. A locomotiva pode ser colocada em nove posições diferentes ao longo da linha.

É necessário observar que a figura 6.6 não representa uma linha de transmissão verdadeira. Uma cascata de estruturas LC representa, na verdade, uma linha de atraso artificial através da qual se está pensando substituir a linha verdadeira. A indutância e a capacitância de cada estrutura são iguais, respectivamente, à indutância e capacitância distribuidas no trecho de linha que a estrutura está substituindo. Deve-se, no entanto, estar atento para o fato de que a linha artificial apresenta um caráter de filtro passa-baixas, enquanto a linha verdadeira apresenta sempre uma resposta plana. Assim como a linha artificial apresenta uma frequência de corte que depende do número de estruturas, é necessário averiguar a relação desta frequência com a frequência de ressonância do sistema. Somente assim é possível assegurar-se de que o número de estruturas em cascata representa bem a linha verdadeira, na faixa de frequências desejada.

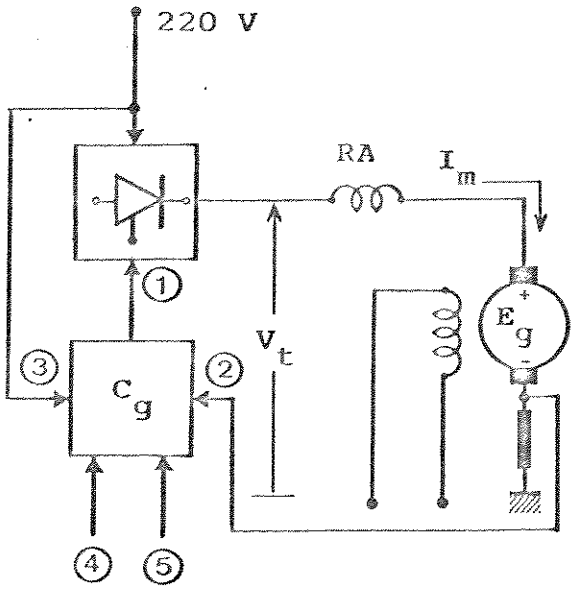
Um estudo da resposta em frequência da linha, nas condições de operação, torna-se necessário [40].

Para completar o modelo, é necessário implementar um sistema elétrico que reproduza o funcionamento da locomotiva.

6.2.4 - Implementação do Modelo da Locomotiva

Como resultado dos desenvolvimentos feitos até este ponto, já está disponivel uma representação básica para o circuito de potência da locomotiva. As magnitudes dos parâmetros deste circuito já foram calculadas, seguindo-se um escalonamento dos mesmos. A mesma coisa se fez com os parâmetros da linha de contato. Trata-se agora de implementar um modelo que permita simular o funcionamento da locomotiva.

Conforme mencionado no capítulo II, interessa simular apenas a operação da locomotiva durante a fase f_1 do processo de aceleração. A figura 6.7 apresenta um esquema básico do modelo que deve ser obtido.

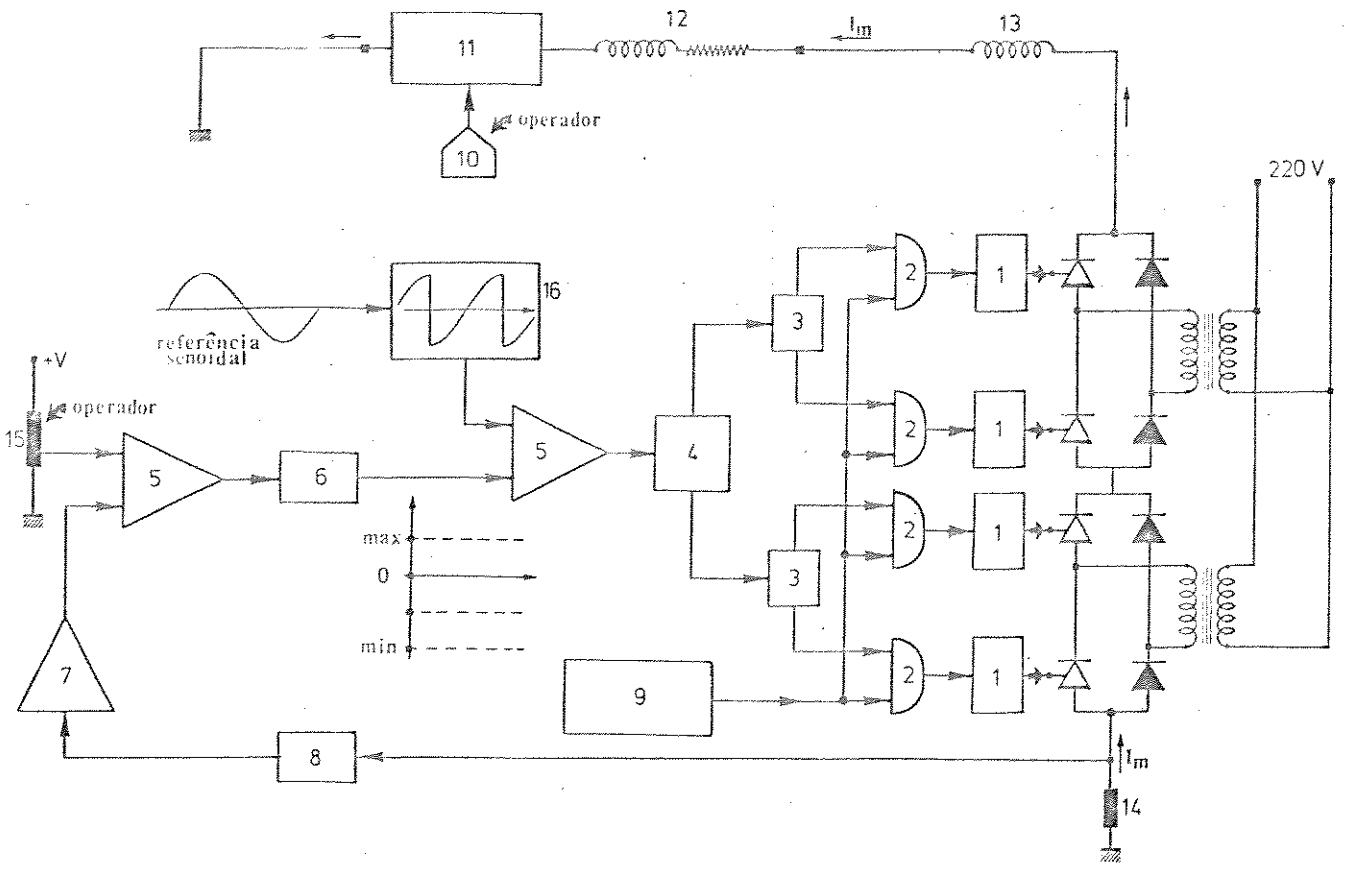


1 - pulso para gatilhamento
2 - realimentaçao de corrente
3 - para a referencia de gatilho
4 - ajuste da corrente I_m
5 - ajuste de velocidade
C_g - bloco de controle de gatilho

Figura 6.7: Esquema do modelo da locomotiva

Este modelo deve permitir que sejam simuladas variações na tensão gerada E_g do motor. Nas condições de fluxo pleno e constante que caracterizam a fase f_1 de aceleração do motor, variações na tensão gerada representam variações na velocidade do mesmo. O circuito deve ser implementado de modo que a tensão terminal V_t possa variar automaticamente a cada variação da tensão gerada que o operador venha provocar, quando precise simular variações na velocidade do motor. De acordo com a figura 2.5 o critério básico de operação da fase f_1 consiste em manter constante a corrente I_m do motor, cujo valor é constantemente realimentado ao bloco de controle C_g. Além de permitir simular variações na velocidade do motor, o modelo deve também permitir que o operador escolha a intensidade de corrente que será mantida pelo controle durante a aceleração do motor.

O diagrama de blocos do circuito que simula o funcionamento da locomotiva está apresentado na figura 6.8.



1 - interfaces de saída ("drivers")
2 - portas lógicas AND
3, 4 - lógica de seleção da ponte a operar
5 - comparadores de sinais
6 - condicionador de sinal
7 - amplificador do sinal de realimentação
8 - filtro
9 - gerador de gatilho
10, 11 - simulador da fcem do motor
12 - parâmetros do motor
13 - reator de alisamento
14 - sensor do sinal de corrente
15 - seleção da corrente de aceleração
16 - geração do sinal de referência para o gatilhamento

Figura 6.8: Diagrama de blocos do circuito da locomotiva

Neste modelo, o operador tem a oportunidade de atuar em dois níveis distintos. Pode selecionar a intensidade de corrente sob a qual será efetuada a aceleração do motor de tra-

ção (bloco 15) e pode simular variações na velocidade do motor fazendo variar a sua força contra-eletromotriz gerada (bloco 10). Duas características importantes deste modelo são discutidas a seguir.

- simulação da fcem do motor

Na verdade, não existe um motor neste modelo; o motor é simulado através de seus parâmetros de resistência ôhmica e de indutância de armadura, utilizando-se um artifício para permitir representar variações na velocidade do mesmo. Sempre que o operador atua no bloco 10 simulando alguma variação na velocidade do motor, a corrente I_m do mesmo tende a variar. Mas esta tendência é captada no sensor (bloco 14) e realimentada às unidades de comando dos tiristores. Assim, os ângulos de gatilhamento são reajustados de modo que o motor continue funcionando com a mesma corrente I_m, sob novas condições de força contra-eletromotriz (fcem).

A figura 6.9 detalha o bloco 11 do diagrama da figura 6.8 e que corresponde à simulação da fcem do motor de tração.

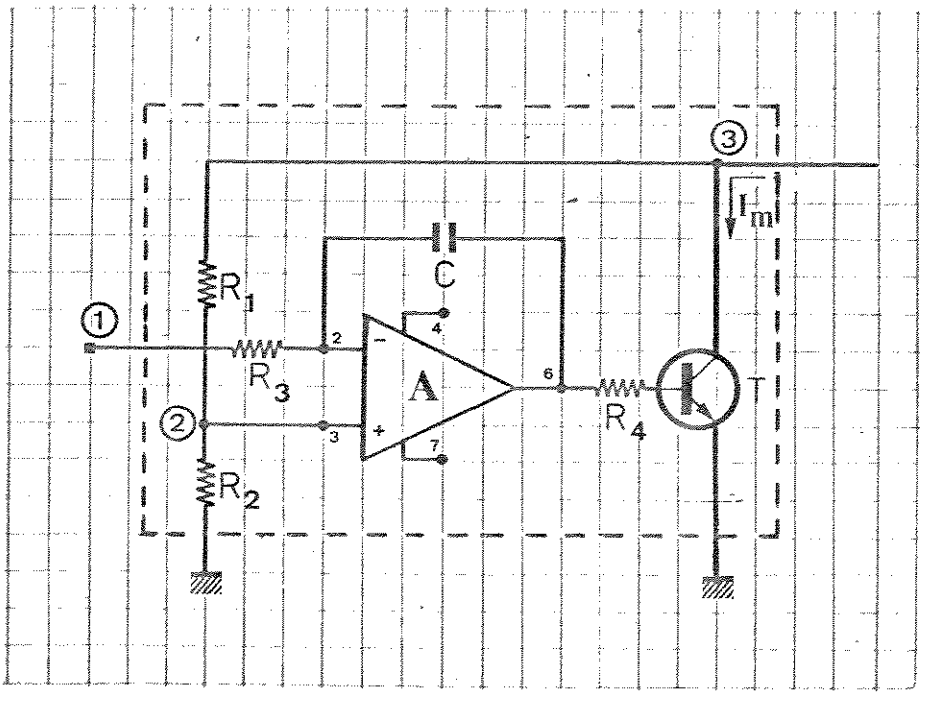


Figura 6.9: Simulação da fcem do motor de tração

Admitindo-se que o transistor T está conduzindo estavelmente a corrente I_m do motor, as tensões V_1 e V_2, respectivamente dos pontos 1 e 2 devem estar praticamente iguais. Se o operador atuar no ponto 1 ($V_1 \geq 0$) fazendo aumentar a tensão V_1, a diferença negativa $V_2 - V_1$, amplificada pelo ampliador operacional A, será aplicada à base do transistor T acarretando uma tendência de redução da corrente I_m, a menos que a tensão V_2 possa acompanhar a variação de V_1. Qualquer tendência de redução da corrente vai fazer variarem os ângulos de gatilhamento dos tiristores das pontes. Isto faz aumentar a tensão V_3 do ponto 3 e, em consequência a tensão V_2 também sobe, equilibrando a tendência de queda da corrente. Assim, é possível conseguir uma ampla variação na tensão V_3, a qual atua como se fosse uma força contra-eletromotriz, sem variar a corrente do motor. Este esquema pode então simular a aceleração do motor sob condições de corrente constante, o que corresponde à estratégia de aceleração durante a fase f_1.

- definição do instante de gatilhamento

O princípio de funcionamento do mecanismo de definição do instante de gatilhamento dos tiristores é apresentado na figura 6.10:

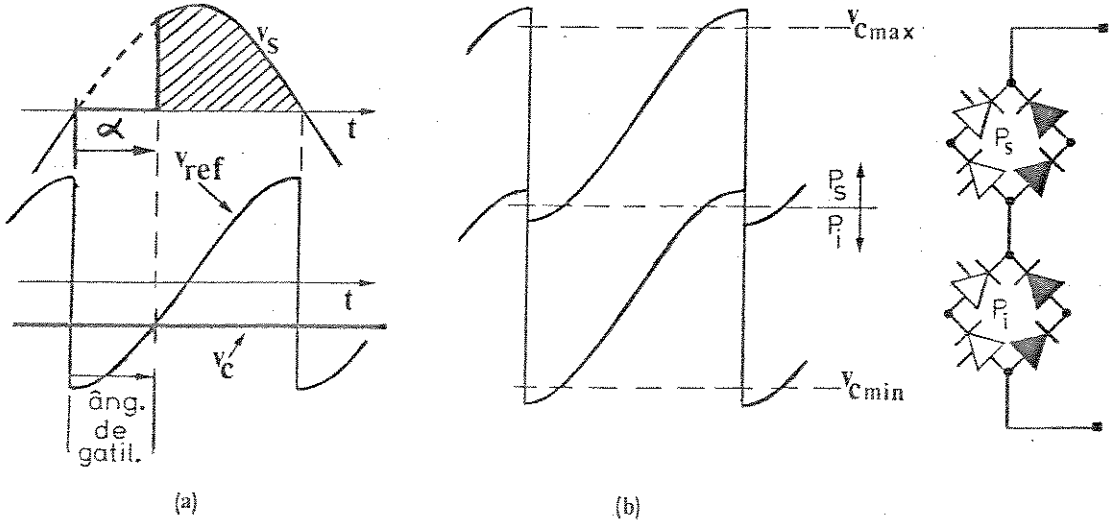


Figura 6.10: Definição do ângulo de gatilhamento

Observa-se, na figura 6.10 (a), que o ângulo de gatilhamento do tiristor é definido comparando-se a tensão de controle V_c com a tensão V_{ref} de referência de controle. A tensão V_{ref} (bloco 16 na Figura 6.8) é obtida através de um circuito especial [41] a partir de uma tensão senoidal V_s de referência.

A definição do instante de gatilhamento dos tiristores pode ser feita através de uma função rampa (como aquela que pode, por exemplo, ser obtida através do circuito integrado TCA 780 da Icotron). Ao menos um fabricante de locomotiva (a BBC) [42], prefere usar a função composta de segmentos senoidais apresentada na figura 6.10 como referência para o controle. O objetivo desta decisão consiste em obter um controle de característica linear porque, com esta função, existe uma relação linear entre a tensão de controle V_c e o valor médio da tensão retificada de saída da ponte. Existem ainda informações de que um controle deste tipo pode apresentar imunidade a possíveis distorções na forma de onda da tensão e outras vantagens descritas na referência. Assim, para construir um simulador que se aproxime mais da realidade, resolveu-se utilizar esta função em vez da função rampa.

A tensão de controle V_c, a qual resulta da comparação do sinal realimentado da corrente com o valor de referência da corrente previamente ajustado (através do potenciômetro 15), deve variar entre um valor $V_{c_{max}}$ e um valor $V_{c_{min}}$. O valor máximo de V_c corresponde ao ângulo máximo de gatilhamento (isto é, ao ângulo mínimo de condução) dos tiristores da ponte P_s, a qual dispara primeiro na sequência de operação. Observa-se, na figura 6.9 (b), que o valor de V_c que corresponde ao mínimo ângulo de gatilhamento da ponte P_s deve ser ajustado de modo que coincida exatamente com o ângulo máximo de gatilhamento da ponte P_i. Desta forma, quando a tensão de controle atingir este valor de V_c, a ponte P_i começa a operar ao mesmo tempo que os ângulos de gatilhamento da ponte P_s param de variar, ficando fixados desde então. A tensão de controle pode continuar variando (isto é, diminuindo) para definir os ângulos de gatilhamento dos tiristores da ponte P_i. Mas não deve ficar abaixo do valor $V_{c_{min}}$

que define o ângulo mínimo de gatilhamento desta ponte. Como se observa na figura 6.8, o valor de V_c , para um dado valor de referência ajustado no potenciômetro 15, varia em função da atuação do operador no bloco 10 visando simular uma variação na velocidade do motor.

Para este projeto de simulador, resolveu-se adotar um valor máximo de 5 V para a função V_{ref}. Com isto, de acordo com a figura 6.11, vem:

$$V_{ref}(t) = -5 \text{ sen } (\omega t + 90^{o}) \quad ; \quad 0 \leq \omega t \leq \pi \qquad (6.1)$$

Em razão do intervalo de sobreposição, $V_{c_{max}}$ não pode atingir a magnitude de 5 V.

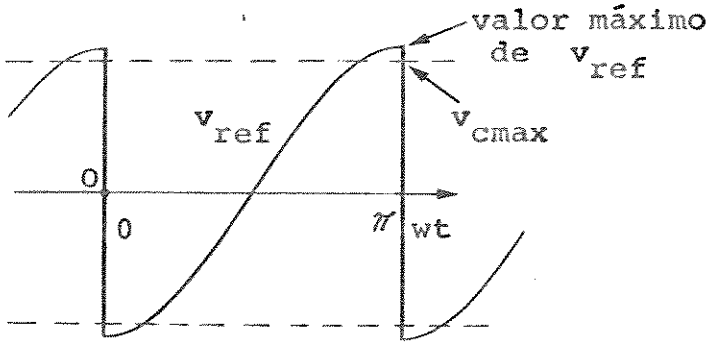


Figura 6.11: Ajuste do valor da tensão de controle

Os ângulos máximo e mínimo de gatilhamento foram então arbitrados em 140^{o} e 40^{o} , respectivamente [**25**]. Isto significa que $V_{c_{max}}$ não deve ser superior a -5 sen (230^{o}) = 3,83 V, nem inferior a -5 sen (130^{o}) = -3,83 V.

Na verdade, quando V_c atinge -3,83 V os ângulos de gatilhamento da ponte P_s (figura 6.10) deixam de variar. Mas a tensão V_c ainda pode continuar diminuindo para permitir o funcionamento, nas mesmas condições, da ponte inferior P_i.

Foram feitos ajustes para que o sinal de controle esteja em $V_{c_{max}}$ no instante em que se simula a partida do motor e chegue em $V_{c_{min}}$ quando a tensão desenvolvida pelas pontes atinja seu valor máximo (cerca de 50 V).

6.3 - Características e Aplicações do Simulador

Após ter sido concluida a implementação do simulador analógico, suas características operacionais foram levantadas no laboratório. Esta parte do trabalho tem também como objetivo examinar a aplicabilidade deste equipamento à simulação de alguns problemas relativos ao tipo de sistema de tração que se pretende representar através do simulador. O resultado desta atividade é apresentado a seguir, sob a forma de oscilogramas diversos obtidos diretamente no simulador. Basicamente serão apresentadas formas de onda de tensões e correntes, as quais foram observadas em diversas partes do modelo, sob determinadas condições.

Antes de se passar à apresentação dos oscilogramas mencionados, é conveniente referir-se à figura 6.12 na qual estão indicadas as tensões e correntes que são mencionadas no texto que se segue.

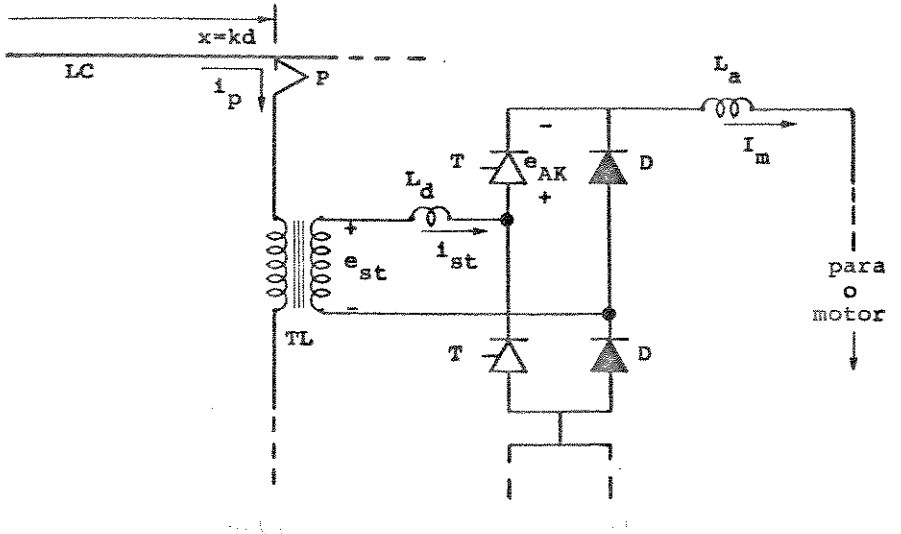
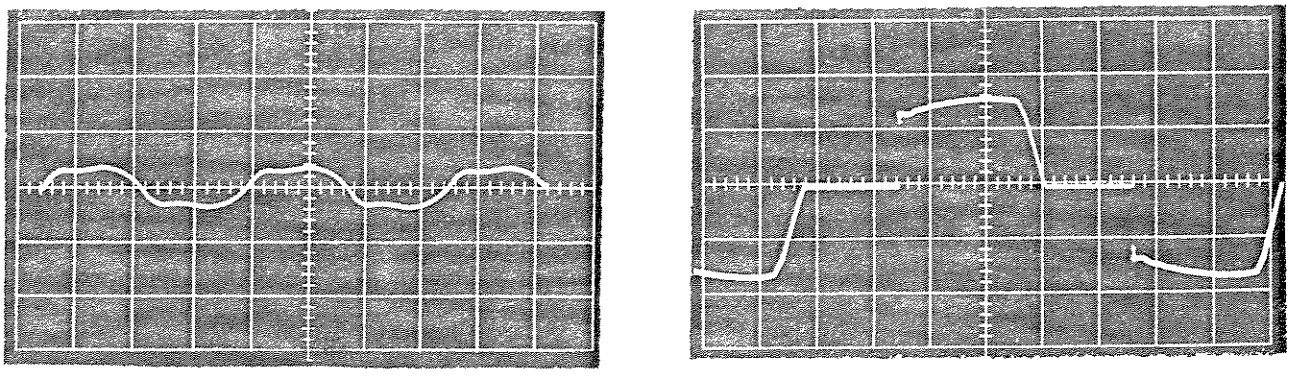


Figura 6.12: Correntes e tensões características

6.3.1 - Formas de onda de correntes

- Corrente de excitação do transformador TL

Conforme já se mencionou, no capítulo III, existem intervalos de tempo durante os quais a corrente I_m do motor circula livremente (e exclusivamente) pelos diodos da ponte retificadora. Nestes intervalos, é nula a corrente i_{st} do enrolamento secundário do transformador da locomotiva. Consequentemente, a corrente i_p do pantógrafo se resume, neste caso, à corrente de excitação do transformador TL da locomotiva. A escolha de uma intensidade de 1 A, para representar, no simulador, a corrente de plena carga do motor, fez com que surgisse a necessidade de se fazer uma seleção, dentre diversos transformadores que estavam disponíveis, daquele que pudesse apresentar a menor corrente de excitação. Nos modelos em escala reduzida, em que pequenos transformadores devem ser utilizados, nem sempre é fácil obter-se a mesma relação que existe, no transformador do sistema real, entre as correntes nominal e de excitação. A figura 6.13 (a) apresenta o oscilograma da corrente de excitação, a qual foi medida no enrolamento primário, quando este operava com 220 V. Observar-se-á que as formas de onda de correntes da linha de contato apresentam esta corrente como uma de suas componentes.



(a) (b)

Figura 6.13: Correntes do transformador TL
(a) Corrente de excitação (0,1A/cm; 5ms/cm)
(b) Corrente de secundário (i_{st})
(0,5A/cm; 2ms/cm)

Para que seja minimizado o efeito da corrente de excitação, deve-se considerar também a conveniência de se escolher uma intensidade maior para a representação da corrente do motor.

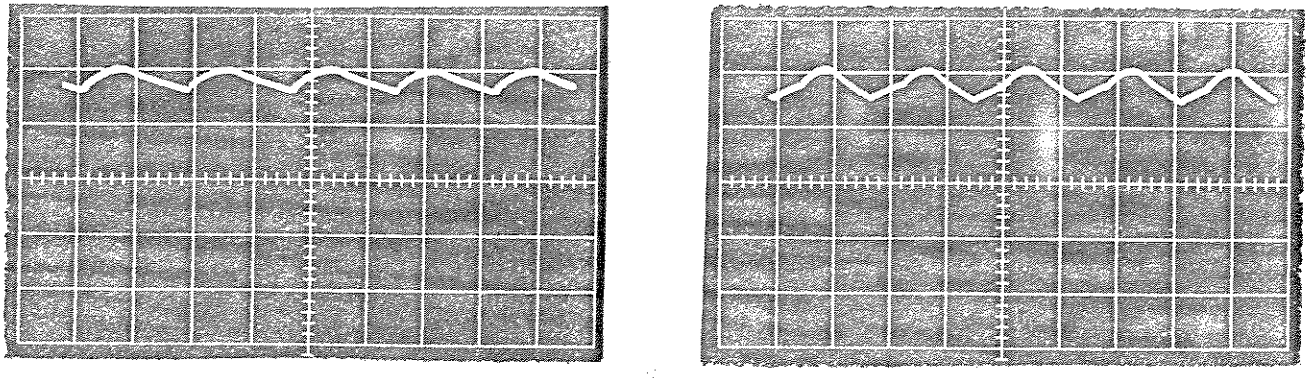
- Corrente de secundário (i_{st}) do transformador TL.

Esta corrente é apresentada na figura 6.13 (b), para a condição em que o motor opera com 80% de plena carga. Apenas uma das duas unidades retificadoras está em operação. Pode-se notar que esta corrente não apresenta componente de excitação. Os intervalos em que ocorre a circulação livre pelos diodos também podem ser identificados na figura.

-Corrente (I_m) do motor de tração

O oscilograma apresentado na figura 6.14 (a) corresponde à corrente do motor para as seguintes condições:

i) apenas uma unidade retificadora está operando (com ângulo de gatilhamento de 90^o);
ii) o motor opera com 95% de plena carga;
iii) o reator de alisamento tem cerca de 400 mH de indutância.



(a) (b)

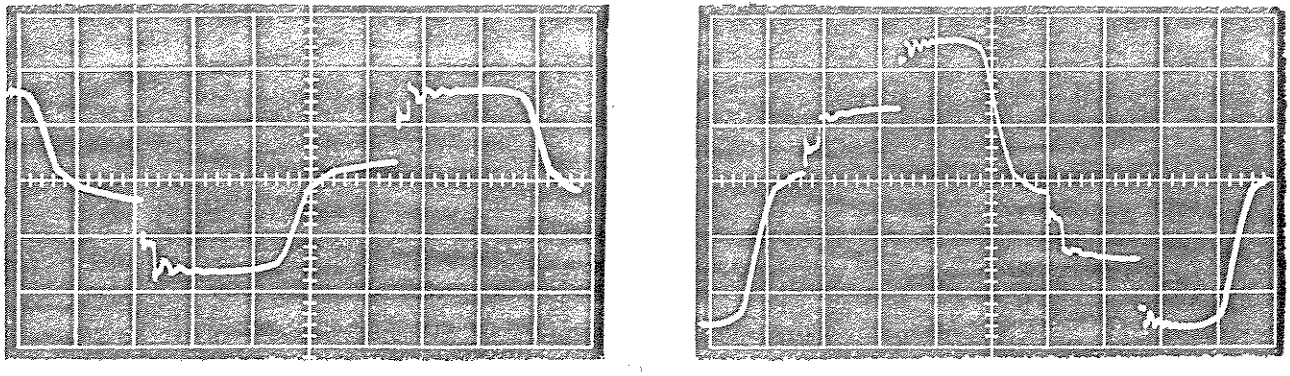
Figura 6.14: Corrente do motor de tração
(a) apenas uma unidade retificadora em operação (0,5A/cm; 5ms/cm)
(b) duas unidades retificaoras em operação (0,5A/cm; 5ms/cm)

A figura 6.14 (b) apresenta o oscilograma da corrente do motor, para o mesmo valor de indutância do reator de alisamento. A única diferença, em relação à figura 6.14 (a), consiste em que, agora, as duas unidades retificadoras da ponte operam em sequência. A primeira unidade está operando com ângulo de gatilhamento α_{min} (cerca de 40^{o}, no caso) e a segunda opera com 90^{o}. Esta última situação, a exemplo daquela apresentada na figura 6.14 (a), também corresponde à operação em regime de torque constante. No entanto, a velocidade do motor agora é maior do que era anteriormente.

É oportuno salientar também, que a corrente do motor apresenta, para ambos os casos, uma ondulação cuja magnitude depende do valor de indutância do reator de alisamento.

- Corrente (i_p) no pantógrafo da locomotiva

Na figura 6.15 são apresentadas as formas de onda da corrente i_p do pantógrafo, para o caso em que o motor opera com corrente nominal (1 A, no simulador). A locomotiva se encontra no final da linha de alimentação.



(a) (b)

Figura 6.15: Corrente no pantógrafo
(a) apenas uma unidade retificadora em operação
(0,1A/cm; 2ms/cm)
(b) duas unidades retificadoras em operação
(0,1A/cm; 2ms/cm)

É fácil identificar, nestes oscilogramas, a corrente de excitação do transformador TL. No capítulo III (figura 3.1) já havia sido apresentada uma expectativa de forma de onda para esta corrente. As únicas diferenças observadas estão no nível de atenuação e na presença da corrente de excitação.

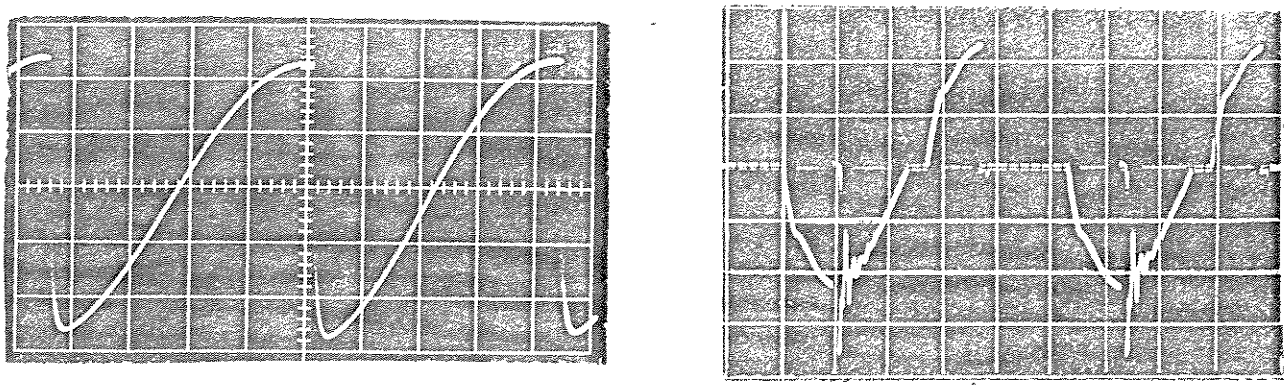
6.3.2 - Formas de Onda de Tensões

- Tensão (v_{ref}) da referência para o gatilhamento

Conforme mencionado no item 6.2.4, a referência para a definição do instante em que deve ocorrer o gatilhamento do tiristor é dada pela tensão v_{ref}, cuja forma de onda no tempo é apresentada na figura 6.16 (a).

- Tensão (e_{AK}) sobre o tiristor

A figura 6.16 (b) apresenta o oscilograma da tensão sobre um dos tiristores, para o caso em que apenas uma unidade retificadora está em operação. A locomotiva se encontra no final da linha de alimentação. O motor opera com 90% da plena carga e o tiristor dispara com 90°.



(a) (b)

Figura 6.16: Tensões características
(a) tensão de referência de gatilho
(2V/cm; 2ms/cm)
(b) tensão sobre o tiristor
(20V/cm; 5ms/cm)

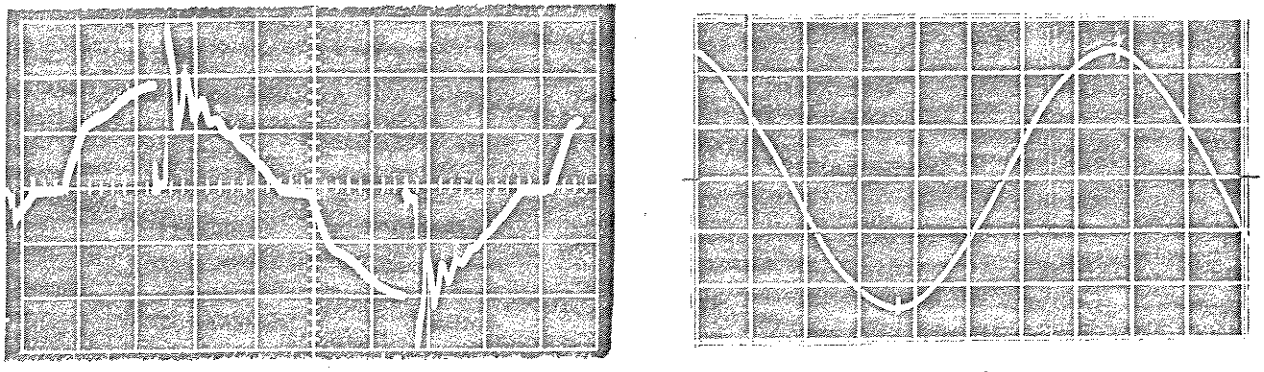
Com relação à figura 6.16 (b), pode-se observar que, durante o semi-ciclo em que o tiristor não está conduzindo, a tensão e_{AK} apresenta uma oscilação transitória (com presença de sobretensão) a qual se verifica no instante em que tem início o processo de recuperação do diodo que está deixando de conduzir. Este fenômeno oscilatório de alta frequência está relacionado com a característica de recuperação do diodo (corrente de recuperação reserva). Para a ponte retificadora, este fenômeno funciona como um processo transitório de origem interna. Constitui-se em um dos fatores mais importantes a ser considerado no dimensionamento da proteção dos semicondutores (circuitos "snubber").

Observou-se, no laboratório, que o transformador da locomotiva absorve uma boa parte deste fenômeno, dimimuindo seu efeito na linha de contato.

Os fenômenos transitórios de natureza oscilatória observados na linha de contato não constituem transitórios de origem interna. O fato de a capacitância da linha e a indutância do transformador da subestação constituirem um circuito ressonante, aliado à característica da corrente que circula pela linha, faz com que se desenvolvam na mesma os mencionados efeitos.

- Tensão (e_{st}) de secundário do transformador TL

O oscilograma desta tensão é apresentada na figura 6.17 (a). O motor funciona com plena carga e a locomotiva se encontra no final da linha de alimentação. Apenas uma unidade retificadora está operando com ângulo de gatilhamento de 90^{o}. Pode-se observar, nesta figura, os períodos em que há sobreposição ("overlap"), quando três semicondutores conduzem ao mesmo tempo, conforme mencionado anteriormente no capítulo III.



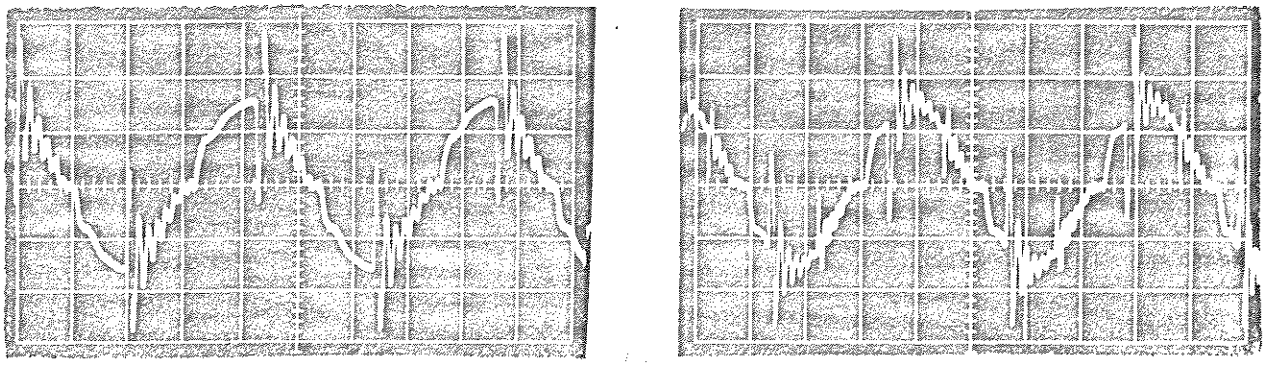
(a) (b)

Figura 6.17: Tensões características
(a) e_{st} (tensão de secundário do transformador TL) (20V/cm ; 2ms/cm)
(b) tensão no pantógrafo (150V/cm; 2ms/cm)

- Tensões medidas ao longo da linha de contato

Formas de onda de tensões podem ser obtidas em qualquer ponto ao longo da linha de contato, para quaisquer circunstâncias que se queira considerar. Para ilustrar este item, três oscilogramas característicos serão apresentados. Na figura 6.17 (b) é apresentada a tensão observada no pantógrafo, para a situação em que a locomotiva se encontra junto da subestação. O motor opera com 90% de sua corrente nominal e apenas uma unidade retificadora está operando (ângulo de gatilhamento de aproximadamente 90^{o}). A forma de onda é essencialmente senoidal e os instantes em que ocorre o gatilhamento podem ser notados. Na figura 6.18 (a) é apresentado o oscilograma da tensão observada no final da linha de alimentação. Neste caso, apenas uma unidade retificadora está em operação ($\alpha \approx 90^{o}$) e o motor opera com 90% de sua carga nominal. Considera-se que a locomotiva se encontra no meio da linha de alimentação.

Na figura 6.18 (b) é apresentado o oscilograma da tensão que se observa no final da linha, ainda com a locomotiva localizada no meio da linha de alimentação. Neste caso, o motor opera nas mesmas condições observadas anteriormente e as duas unidades retificadoras da ponte estão agora operando em sequência.



(a) (b)

Figura 6.18: Tensões no final da linha de contato
(a) apenas uma unidade retificadora em operação
(b) duas unidades retificadoras em operação
(200V/cm; 5ms/cm)

6.3.3 - Variação de Parâmetros do Simulador

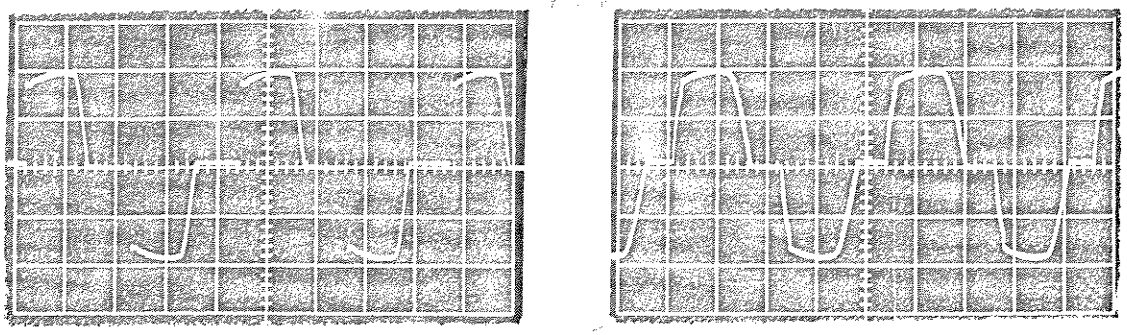
Uma das características mais interessantes do simulador analógico consiste no fato de que seus parâmetros podem sofrer variações. O efeito destas variações nas diversas partes do sistema pode ser avaliado. Excetuando-se as variações regulares que podem ser feitas no ângulo de gatilhamento e na posição da locomotiva, são apresentados a seguir alguns efeitos resultantes de variações nas indutâncias L_d e L_a.

- Variação da indutância L_d de dispersão do transformador TL

No simulador analógico, o transformador da locomotiva apresenta, por construção, uma indutância de dispersão de 23 mH. Este valor de indutância pode ser aumentado através da instalação de uma bobina em série com o enrolamento de secundário. Ensaios foram feitos, inicialmente sem o acréscimo desta bobina, e, posteriormente, com o acréscimo de uma bobina de 20 mH.

As figuras 6.19 (a) e 6.19 (b) apresentam as formas de onda da corrente i_{st} para os casos em que L_d = 24 mH e

L_d = 43 mH, respectivamente. Em ambos os casos, o motor funciona com 90% de plena carga e somente uma unidade retificadora está em operação (com ângulo de gatilhamento de 90^o).



(a) (b)

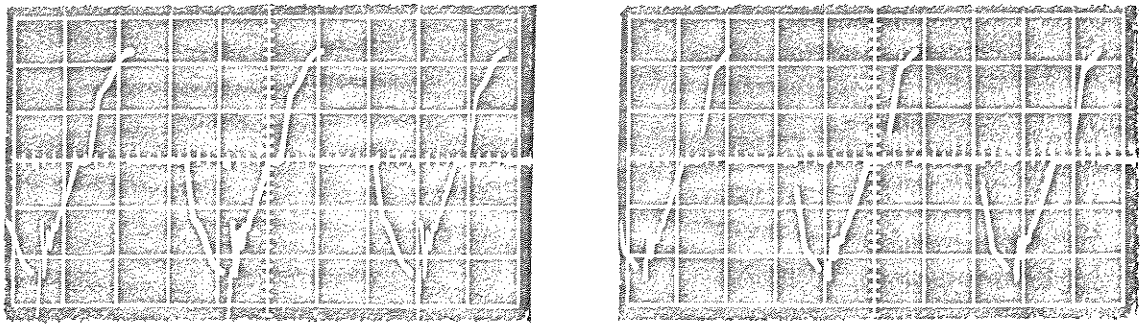
Figura 6.19: Corrente de secundário do transformador TL
(a) L_d = 24 mH (0,5A/cm; 5ms/cm)
(b) L_d = 43 mH (0,5A/cm; 5ms/cm)

Faz-se necessário chamar a atenção para dois pormenores que resultam do aumento do valor desta indutância:

i) A taxa de variação da corrente diminui (a corrente apresenta uma subida mais lenta). Este fato, conforme mencionado no capítulo III, acarreta variações nas amplitudes dos harmônicos que compõe a corrente;

ii) O intervalo em que ocorre a circulação livre sofre uma redução no seu tempo de duração.

As figuras 6.20 (a) e 6.20 (b) representam formas de onda da tensão e_{AK} medidas entre os terminais de um tiristor.



(a) (b)

Figura 6.20 : Tensão sobre o tiristor
(a) L_d = 24 mH (20V/cm; 5ms/cm)
(b) L_d = 43 mH (20V/cm; 5ms/cm)

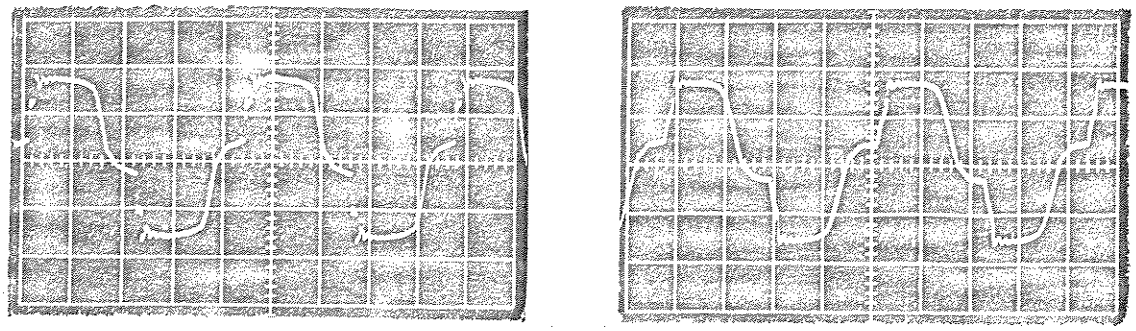
Observe-se que os tempos de sobreposição do diodo e do tiristor são maiores para o caso em que a indutância de dispersão é maior. Pode-se ainda notar, pela figura 6.20 (b), que ocorre uma redução considerável da oscilação existente. As formas de onda da corrente do pantógrafo também apresentam diferenças, em razão de variações no valor desta indutância. Este fato pode ser visualizado através das figuras 6.21. Pode-se também notar, que a derivada que a corrente apresenta logo após o gatilhamento do tiristor sofre variações.

Quanto às oscilações da corrente, estas resultam mais atenuadas em razão do aumento de indutância de dispersão do transformador.

As condições sob as quais os oscilogramas de corrente das figuras 6.21 foram obtidos são as mesmas da figura anterior.

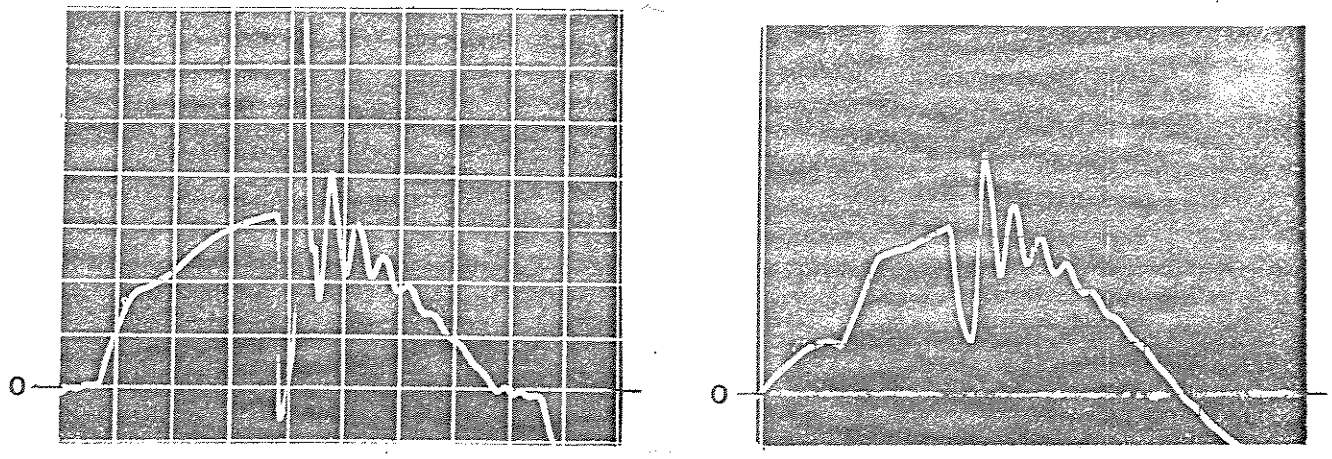
Finalmente, a tensão na linha de contato também é afetada pelo acréscimo de indutância de dispersão. As figuras 6.22 (a) e 6.22 (b) demonstram esta influência. No caso, apenas

uma unidade retificadora opera com ângulo de gatilhamento de cerca de 90°. O motor funciona com plena carga, a locomotiva se encontra no meio do trecho e a tensão apresentada na figura 6.22 é medida no final da linha de contato.



(a) (b)

Figura 6.21: Corrente no pantógrafo da locomotiva
(a) L_d = 24 mH (0,1A/cm; 5ms/cm)
(b) L_d = 43 mH (0,1A/cm; 5ms/cm)



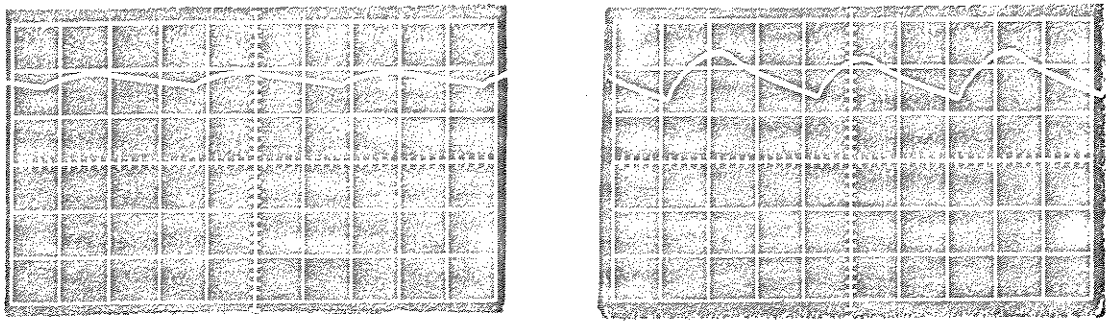
(a) (b)

Figura 6.22: Tensão no final da linha de contato
(a) L_d = 24 mH (100V/cm; 1ms/cm)
(b) L_d = 43 mH (100V/cm; 1ms/cm)

- Variação da indutância L_a de alisamento

No simulador analógico, existe a possibilidade de que sejam feitas variações na indutância de alisamento desde

90 mH até 640 mH. A figura 6.23 apresenta os oscilogramas da corrente do motor para L_a = 600 mH e L_a = 100 mH, respectivamente. Neste caso, apenas uma unidade retificadora está em operação. O motor funciona com 90% de plena carga e o ângulo de gatilhamento é 90°.



(a) (b)

Figura 6.23: Corrente do motor de tração
(a) L_a = 600 mH (0,5A/cm; 2ms/cm)
(b) L_b = 100 mH (0,5A/cm; 2ms/cm)

Quanto maior o valor da indutância de alisamento L_a , menor a amplitude da ondulação apresentada pela corrente do motor.

A figura 6.24 apresenta os oscilogramas da corrente do pantógrafo para dois valores distintos de indutância de dispersão. Nas figuras 6.24 (a) e (b), apenas uma das duas unidades retificadoras está em operação. Nas figuras 6.24 (c) e (d), as duas unidades operam em sequência. É interessamente notar-se que a forma de onda da corrente do pantógrafo é significativamente influenciada pela quantidade de indutância que está em série com o motor.

Conforme já se mencionou anteriormente, diversos outros ensaios foram feitos utilizando-se o simulador. O material desenvolvido neste item tem apenas a função de mostrar a aplicação do simulador a alguns destes casos.

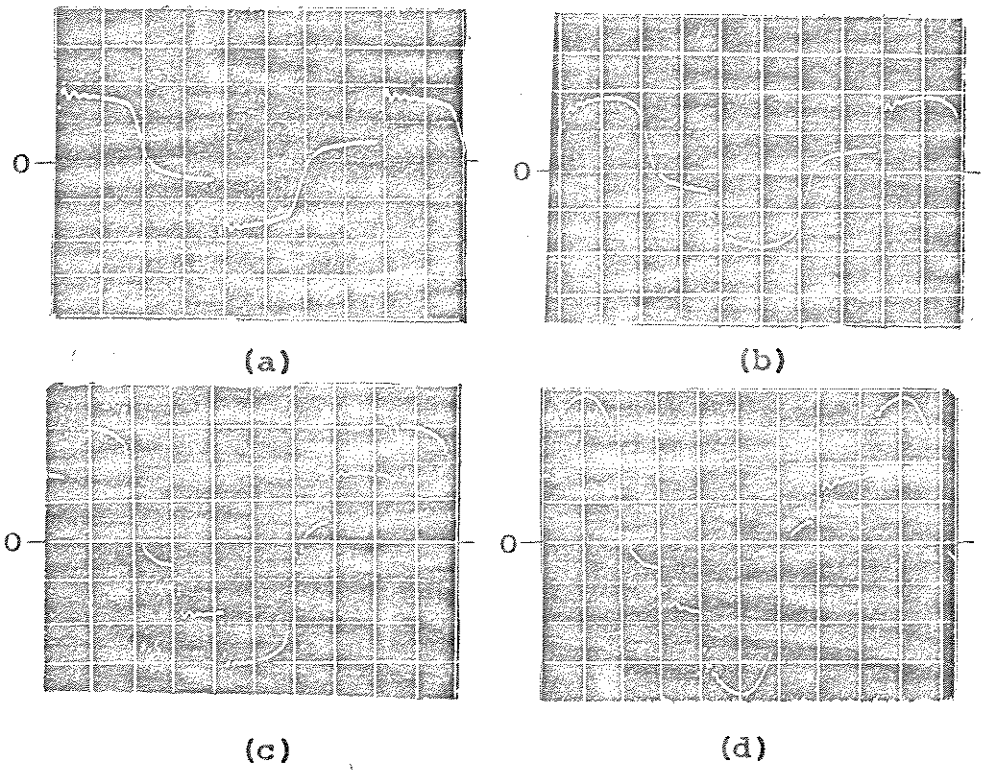


Figura 6.24: Corrente no pantógrafo (0,1A/cm; 2ms/cm)
(a) L_a = 600mH; (b) L_a = 100mH
apenas uma unidade retificadora em operação
(b) L_a = 600mH; (d) L_a = 100mH
duas unidades operando em sequência

Para concluir a apresentação do simulador analógico, a figura 6.25 apresenta uma fotografia do mesmo. Na parte inferior da montagem estão as bobinas de alisamento e o transformador da locomotiva; na parte média está instalado o modelo que simula a linha de alimentação e na parte superior estão as diversas funções de controle. Todos os circuitos de controle estão montados em chapas de circuito impresso e constituem circuitos eletrônicos compostos de componentes usuais e de circuitos integrados diversos.

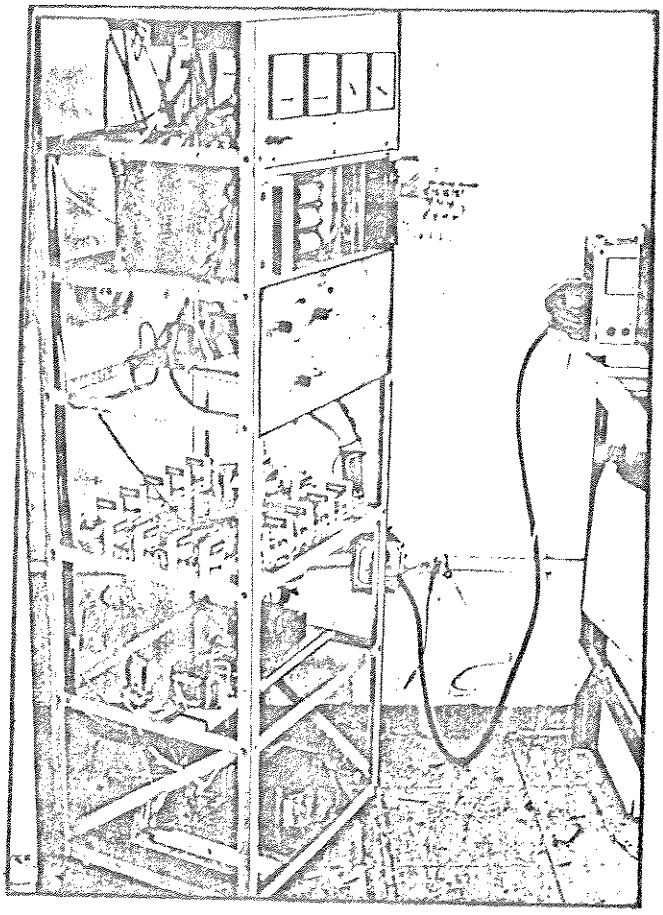


Figura 6.25: Aspecto do simulador analógico

6.3.4 - Conclusões

O material apresentado neste item 6.3 vem demonstrar a conveniência de se poder dispor de um simulador para o sistema de tração. Sendo um modelo que permite representar razoavelmente o sistema real, as formas de onda observadas mostraram boa correlação com aquelas correspondentes deste sistema, conforme se observa na bibliografia pertinente.

CAPÍTULO VII

APLICAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

O objetivo que se tem neste capítulo, consiste em apresentar e discutir resultados de aplicações realizadas do programa de cálculo digital ao estudo de sobretensões em uma determinada linha de alimentação. Estudos foram realizados posteriormente, como o objetivo de se definir a melhor posição para a instalação de um filtro que alivie as sobretensões encontradas.O resultado destes estudos, juntamente com os resultados de uma análise de sensibilidade dos parâmetros do filtro, são apresentados e discutidos a seguir. Os resultados de estudos experimentais realizados no simulador analógico, desenvolvido no capítulo VI, também são apresentados.

Antes que sejam apresentados as aplicações mencionadas algumas considerações iniciais precisam se feitas.

7.1 - Considerações Iniciais

Os estudos do problema de sobretensões na linha de contato, realizados pela via do cálculo digital, iniciaram-se com o estabelecimento de um modelo matemático para a simulação do sistema de tração. A partir deste modelo, o qual foi proposto no capítulo III, um programa computacional seria preparado para viabilizar os cálculos necessários. Como a evolução no tempo das tensões desenvolvidas ao longo da linha de contato, durante o processo de aceleração da locomotiva, constitui um dado fundamental para esta análise, tratou-se de produzir um programa que pudesse fornecer este perfil de tensões. Os desenvolvimentos realizados no capítulo IV tem o objetivo de estabelecer as formas pelas quais este cálculo possa ser feito através de algum algoritmo derivado do método de Schnyder-Bergeron. Uma pesquisa realizada no início deste trabalho veio revelar que este método

é o mais adequado para a abordagem deste tipo de problema pela via digital. Não obstante, conforme mencionado no capítulo IV, algumas conclusões também podem ser obtidas, de maneira interessante, quando é utilizado o diagrama de treliças.

O programa de cálculo digital permite considerar qualquer valor para o ângulo de gatilhamento dos tiristores. Como se trata de estabelecer algumas considerações básicas para o exame do problema, não se cogitando resolver nenhum problema específico, o simulador analógico foi utilizado para a determinação do instante de gatilhamento em que os maiores valores de crista são observados. Tendo-se concluido que esta condição corresponde ao gatilhamento em 90^{o}, os resultados computacionais a seguir apresentados correspondem a esta condição.

Uma outra consideração interessante corresponde à duração do intervalo de sobreposição que se segue ao instante em que se dá o gatilhamento. Evidentemente, deve-se considerar que o intervalo de sobreposição termina quando a corrente do tiristor atinge a magnitude da corrente do motor. Este é o critério para o estudo de um caso específico. Em uma investigação menos específica, o aspecto mais interessante a considerar é a evolução da corrente de comutação. A condição mais crítica corresponde a definir o fim deste intervalo no instante em que esta corrente passa por um máximo local ou que a mesma apresente um ponto de inflexão. O próprio programa digital pode ser utilizado na determinação da evolução da corrente de comutação. Não obstante, o item 7.3 é dedicado ao cálculo desta corrente através de expressões analíticas.

A partir deste ponto serão abordadas as duas questões mais importantes do estudo realizado:

(a) a técnica de detecção da presença de sobretensões, e
(b) as medidas que permitam aliviar as sobretensões eventualmente detectadas.

7.2 - Detecção de Sobretensões na Linha de Contato

Para comprovar a eficácia do programa de cálculo digital na detecção de sobretensões, um exemplo de sistema de tração foi considerado. Seus parâmetros, mencionados a seguir, foram escolhidos com base no simulador analógico.

L_s = 1,6 mH ; L_c = 24 mH ; Z_o = 335Ω
r_s = 7Ω ; r_c = 70Ω ; R_o = 150Ω
T = 212 μseg ; v = 220

O tempo de simulação foi fixado em 1,5 mseg e foram assumidas ainda as seguintes condições adicionais:

- operação de apenas uma unidade retificadora da ponte, com ângulo de gatilhamento de 90°,
- o intervalo de sobreposição termina quando a corrente da linha atinge 170 mA;
- a linha de alimentação (32 Km de extensão) foi subdividida em 8 segmentos iguais para efeito da simulação.

Para cada posição ocupada pela locomotiva (0,1,2,...,8) foram obtidos gráficos da tensão em função do tempo em todas as posições da linha de alimentação. O objetivo desta providência consiste em averiguar o comportamento da tensão em uma dada posição da linha, em função da posição em que se encontra a locomotiva.

A título de ilustração, a figura 7.1 (a) apresenta a evolução no tempo da tensão verificada na terminação final (posição 8) da linha, para o caso em que a locomotiva se encontra na posição 7. A figura 7.1 (b) apresenta a tensão verificada no meio do trecho de linha (posição 4), para a locomotiva alocada na posição 7.

A figura 7.1 mostra que a tensão no final da linha apresenta um pico de 490 V a 467 μseg do início da simulação.

Como a simulação iniciou-se no instante em que a tensão tinha uma magnitude de 311 V, verifica-se, neste instante, uma sobretensão da ordem de uma vez e meia.

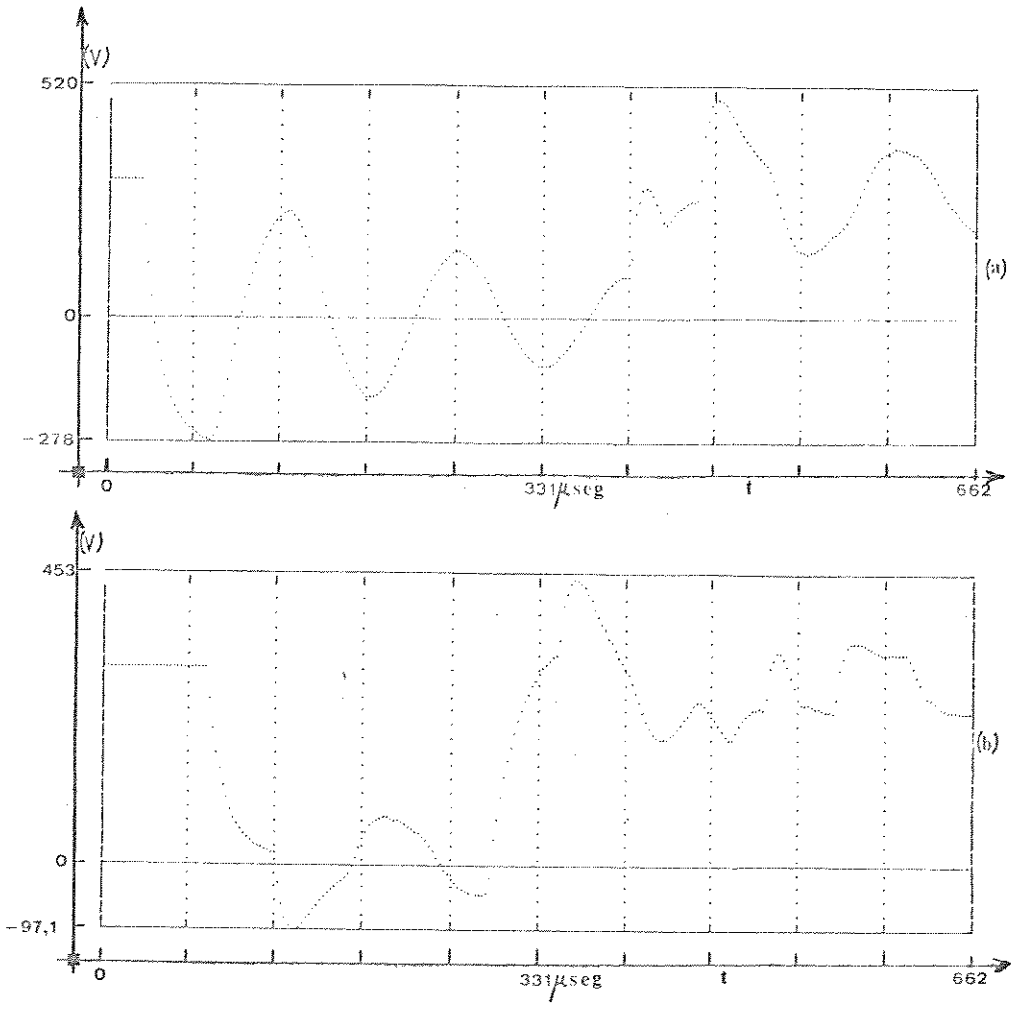


Figura 7.1: Tensão na linha de contato
(a) na posição 8; (b) na posição 4
locomotiva na posição 7

Observe-se também, nos gráficos da figura 7.1, além dos instantes em que ocorrem picos de tensões, os atrasos verificados no início de variação da tensão.

No exemplo apresentado, a tensão em cada posição da linha de contato é calculada pelo programa, a cada 2,65 μseg, e armazenada para posteriormente sair através de um "plotter". Este mesmo conjunto de pontos pode ser examinado através da análise de Fourier para que se conheça o conteudo de harmônicos da

tensão da linha. Como esta análise não foi feita neste trabalho, o programa foi modificado para que fornecesse apenas o valor máximo da tensão observada em uma dada posição genérica da linha de alimentação. O objetivo deste direcionamento visa responder a duas questões fundamentais:

(a) Qual é o máximo valor de tensão verificado no pontógrafo da locomotiva, quando esta ocupa as mais diversas posições ao longo da linha?
(b) Escolhida uma dada posição na linha, qual o máximo valor de tensão aí verificado, quando a locomotiva ocupa as mais diversas posições na linha?

A primeira pergunta revela a preocupação com o equipamento da locomotiva. Sua resposta fornece os subsídios necessários para o projeto da proteção dos semicondutores das pontes retificadoras. Na segunda pergunta reside a preocupação com a proteção do equipamento de linha de contato ou ainda, se houver mais de uma locomotiva em operação, a preocupação inclusive com esta outra locomotiva.

Para o exemplo que foi considerado, os cálculos efetuados permitiram tirar a seguinte conclusão:

- a tensão máxima verificada no pantógrafo da locomotiva ocorreu quando a mesma se encontrava na terminação final da linha.

Esta mesma conclusão já havia sido tirada através do simulador analógico. A figura 7.2 apresenta os resultados obtidos.

Como a terminação final da linha revelou-se uma posição especialmente crítica, sua tensão máxima foi pesquisada. Tanto no cálculo digital quanto nas observações no simulador, esta tensão máxima vai ocorrer quando a locomotiva se encontra no entorno da posição média da linha. O programa digital fornece também o instante em que se observou o valor máximo da tensão.

Do exposto, pode-se concluir que o programa de

cálculo digital permite detectar a presença de sobretensões, indicando inclusive o instante e a posição em que esta se verifica. O fato de a terminação final da linha permanecer em circuito aberto realmente produz sobretensões na locomotiva, quando esta se encontra nesta posição. Detectado o problema, faz-se necessário pensar em resolvê-lo. Isto será considerado no item 7.4.

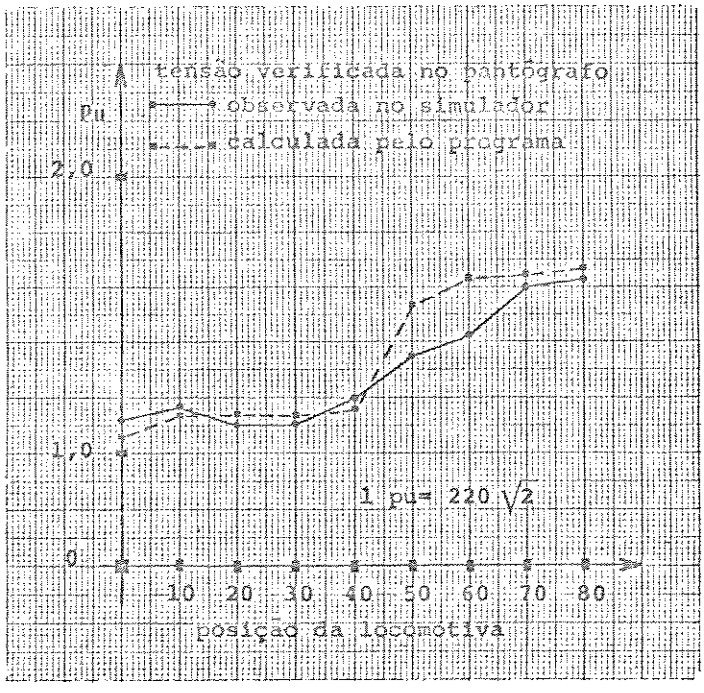


Figura 7.2: Tensão máxima no pantógrafo

7.3 - Detecção de Sobretensões Via Expressões Analíticas

Antes que as simulações digitais sejam realizadas, faz-se necessário, como visto, definir algumas condições de cálculo. Diversas avaliações e expectativas de evolução de correntes e de tensões foram realizadas através das expressões analíticas desenvolvidas no capítulo IV. Estas expressões permitem uma visualização do processo transitório que está se verificando na linha de contato.

Como exemplo de avaliação pelo uso destas expressões, considere-se o caso em que a locomotiva se encontra na terminação final da linha. De acordo com a figura 4.13, fechada a chave CH, surge nesta terminação uma onda refletida e_1^- cuja expressão é dada por:

$$e_1^- = h_c(t) * \frac{1}{2} V_o(t) - \frac{1}{2} V_o(t) \qquad (7.1)$$

considerando-se a terminação puramente indutiva, vem:

$$h_c(t) = \delta(t) + 2a \exp(at) \quad ; \quad a = -\frac{Z_o}{L_c} \qquad (7.2)$$

Admitindo-se que a chave é fechada no instante em que a tensão v(t) atinge seu valor de pico v_p, obtém-se $v_o(t) = v_p$. Efetuando-se as operações indicadas na expressão (7.1), obtém-se (após considerar-se o atraso de propagação):

$$e_1^-(x,t) = v_p \{\exp [a(t - T + \frac{x}{u})] - 1\} \quad ; \quad t > T - \frac{x}{u} \qquad (7.3)$$

Agora o algoritmo do diagrama de treliças pode ser utilizado para o cálculo das formas de onda da tensão e da corrente em qualquer ponto da linha.

Neste caso, os cálculos foram efetuados tendo-se por objetivo obter o início do processo de evolução da corrente de comutação. Os resultados desta expectativa de variação da corrente são apresentados na figura 7.3

Neste caso, admite-se que o período de sobreposição deve terminar quando a corrente de comutação atingir 165 mA, conforme indicado na figura.

A mesma curva da figura 7.3 foi obtida através do cálculo digital. Esta curva é apresentada na figura 7.4

No esquema da figura 7.5 está colocada a situação em que a locomotiva se encontra ao longo da linha de alimentação, em uma posição genérica. A figura 7.5 (a) apresenta a condição de regime existente na linha, até o instante imediatamente anterior ao gatilhamento. Segundo a figura 7.5 (b), a onda de tensão refletida e^-, a qual viaja na linha no sentido da locomotiva para a subestação, é composta, após o gatilhamento, de duas componentes:

- a componente de e_o^+ refletida pela locomotiva, e
- a componente transmitida para o outro lado da linha, a qual resulta da incidência de e_o^- na locomotiva.

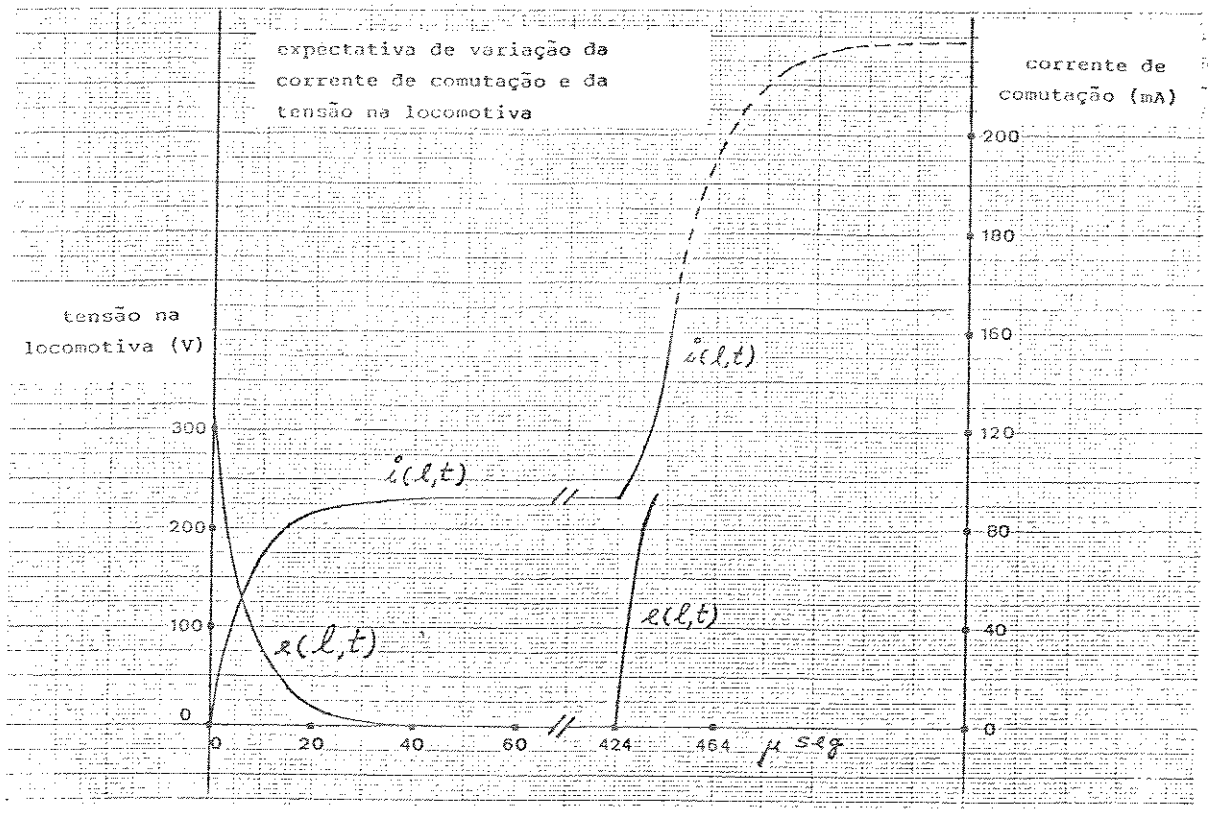


Figura 7.3: Expectativa de variação da corrente de comutação

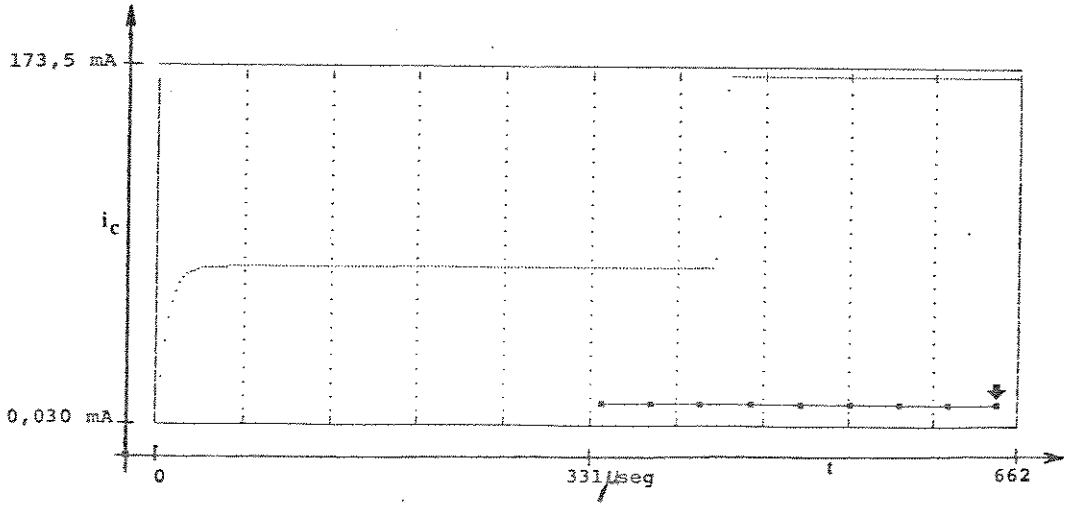


Figura 7.4: Corrente de comutação (locomotiva em x = ℓ)

Conforme indicado na figura 7.5, a situação com relação à onda e^+ é inteiramente análoga.

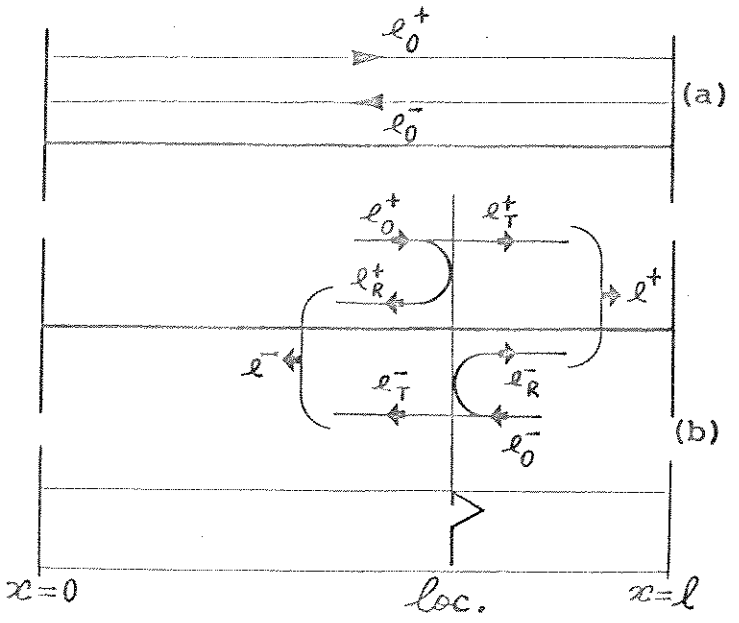


Figura 7.5: Distribuição de ondas de tensão
(a) antes do gatilhamento
(b) imediatamente depois do gatilhamento

Para que se possa chegar às expressões da tensão e da corrente do pantógrafo, coeficientes de reflexão e de transmissão precisam ser definidos para a locomotiva. Através de manipulações análogas a aquelas indicadas no capítulo IV, pode-se chegar à expressão analítica para a corrente de comutação. Conforme mencionado no capítulo III, em razão da posição da locomotiva, os cálculos se tornam bastante envolventes mas permitem uma ótima visualização física da evolução do fenômeno.

A figura 7.6 apresenta o resultado do cálculo da corrente de comutação, para o caso em que a locomotiva se encontra na posição indicada (posição 7).

Sendo T o tempo de percurso da linha, consideran-

do-se a posição ocupada pela locomotiva no trecho, conclui-se que a expressão de cálculo da corrente precisa ser revista a cada intervalo de tempo de duração T/4. Isto ocorre porque a onda de tensão e^+ que se inica em t = 0, na locomotiva, retorna à locomotiva no instante t = T/4, após refletir-se no final da linha. Esta onda, ao incidir na locomotiva, dá origem a uma componente refletida e outra transmitida. A cada intervalo de duração T/4, a figura 7.5 (b) continua a se aplicar. Mas é necessário que se atente para a nova condição a partir da qual a corrente ou a tensão devem ser calculadas.

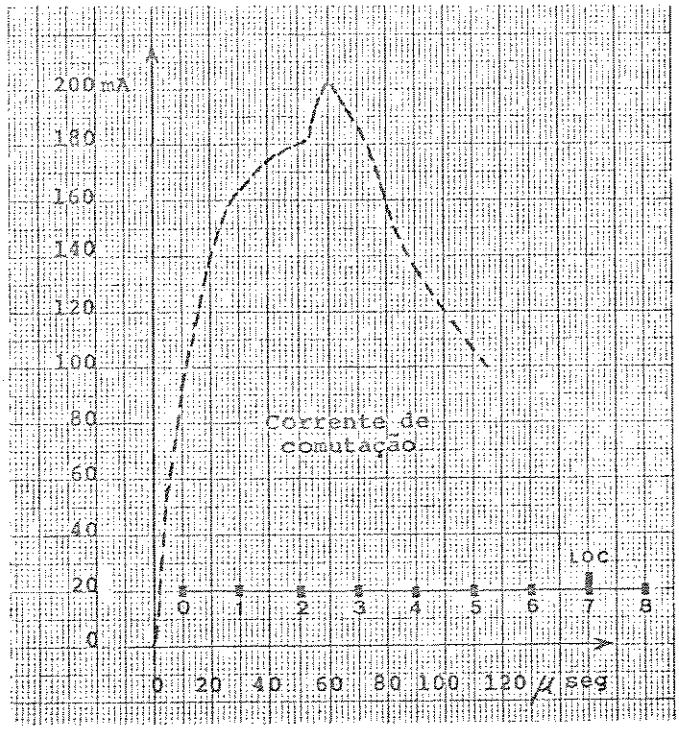


Figura 7.6: Evolução da corrente de comutação

Os cálculos efetuados vem mostrar que, em virtude das reflexões no final da linha, a corrente apresenta oscilaçãoes que não são verificadas, caso a locomotiva se encontre no fim do trecho de linha.

A evolução desta corrente no tempo, calculada pela via do cálculo digital, é apresentada na figura 7.7. O instante em que termina o intervalo de sobreposição pode ser observado na figura.

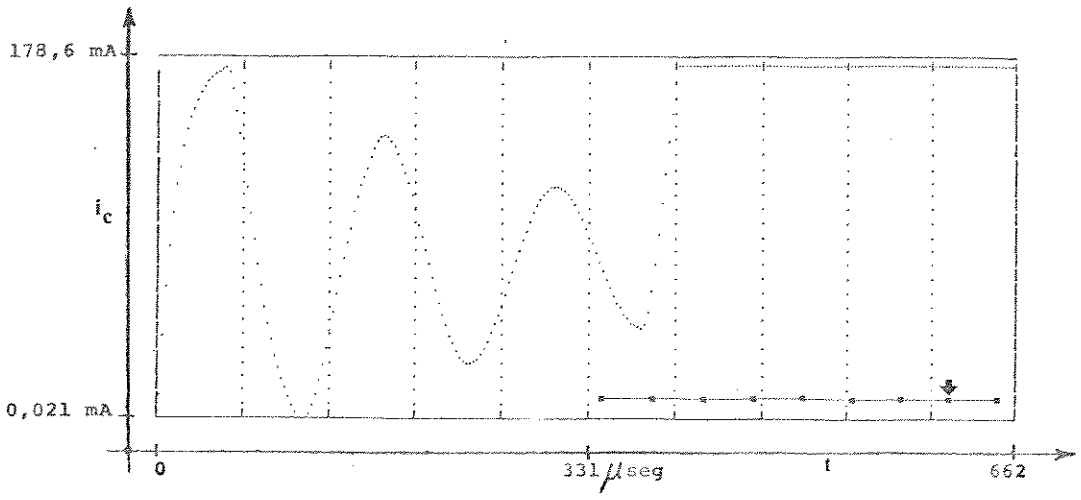


Figura 7.7: Evolução da corrente de comutação

A título de conclusão deste item, interessa mencionar que os cálculos efetuados através de expressões analíticas permitem uma boa visualização do processo, mas não podem ser estendidos muito no tempo, para que não se tornem muito trabalhosos (principalmente se a locomotiva não se encontra no final da linha de alimentação). Além disto, como consideram invariável a tensão da fonte, podem acarretar erros se durarem muito. No entanto, como as condições mais críticas em uma análise geral pressupõe a ausência de perdas e o gatilhamento com ângulo de 90°, esta via de cálculo se torna interessante para estes casos.

7.4 - Uso de Filtros na Redução do Nível de Sobretensões

Já se conclui o que o programa de cálculo digital permite fazer a detecção da presença de sobretensões na linha de alimentação. A medida mais eficiente para a contenção do nível de tensão implica na instalação de filtros. No capítulo V, descreveu-se a forma pela qual o programa foi modificado para considerar a análise do problema quando se admite a presença de filtro instalado no sistema. Neste item serão apresentados e discutidos os testes realizados neste sentido. Antes porém, al-

gumas observações iniciais serão feitas quanto aos tipos de filtros utilizados.

7.4.1 - Escolha do Tipo de Filtro a ser Utilizado

Conforme mencionado no capítulo V, as reflexões das ondas que viajam na linha, durante o processo de aceleração da locomotiva, são, em última análise, as responsáveis pelas sobretensões que surgirem. A terminação final da linha é, neste particular, especialmente importante por causa das reflexões que ocorrem na mesma. A primeira idéia que surge consiste em terminar a linha com um resistor de magnitude igual ao valor da impedâncias de surto da mesma. Com esta providência se consegue reduzir as sobretensões. A medida não é, no entanto, usual por causa da magnitude das perdas observadas na frequência fundamental. Na verdade, existem diversos tipos de filtros que podem ser utilizados, mas a decisão a respeito de qual deles deve ser adotado precisa ser precedida de uma análise da frequência de ressonância do sistema e de considerações a respeito da perda de potência no filtro.

Nos experimentos que são apresentado a seguir, um filtro do tipo RC série é utilizado. Isto não significa que, em se tratando da solução de um problema específico, a indicação não possa ser inteiramente diferente. O filtro RC é, no entanto, bastante recomendado; porisso foi escolhido para ilustrar os estudos que se seguem.

7.4.2 - Definição de Parâmetros do Filtro pela Via Analógica

Através da exploração de uma das propriedades mais interessantes do simulador analógico - a flexibilidade na variação de parâmetros - ensaios foram feitos com o objetivo de se chegar a valores razoáveis de parâmetros para um filtro RC série. Este filtro, quando instalado na linha de alimentação, deveria eliminar os picos de sobretensões observados na mesma. Após ter sido feito um exame da situação, não foi difícil de se

concluir que se deveria partir de um valor inicial de resistência que tivesse a mesma magnitude da impedância de surto da linha de alimentação. Os resultados deste estudo permitiram adotar um filtro RC com R = 3800Ω e C = 220 nF. O valor da capacitância foi escolhido através de inspeção da forma de onda da tensão. A seguir, procurou-se verificar como este filtro atuava quando localizado em diferentes posições ao longo da linha. A figura 7.8 (a) apresenta o oscilograma da tensão observada na terminação final da linha quando não existem filtros instalados ao longo da mesma. No caso em questão, a locomotiva se encontra na terminação que está sendo observada. Apenas uma unidade retificadora opera com ângulo de gatilhamento de 90° e o motor funciona com 90% de sua carga nominal.

O oscilograma da figura 7.8 (b) apresenta a mesma tensão, nas mesmas condições, mas um filtro está instalado na terminação final da linha.

Este mesmo filtro, quando instalado na posição média do trecho de linha, consegue também influenciar a tensão verificada na posição final da linha, conforme apresentado na figura 7.9. Mas a qualidade da filtragem não é igual.

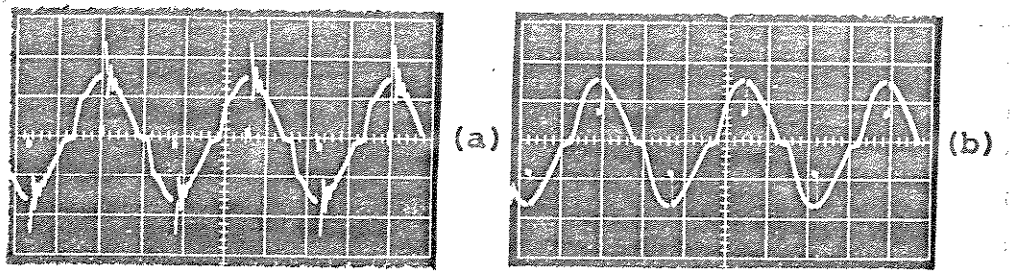


Figura 7.8: Tensão no final da linha (200 v/cm; 5 ms/cm)
(a) sem filtro instalado; (b) com filtro RC instalado (R = 3800Ω ; C = 220 nF)

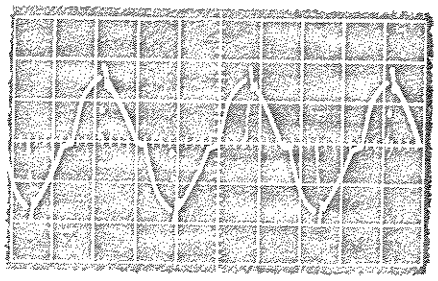


Figura 7.9: Tensão no final da linha filtro instalado no meio do trecho (R = 3800Ω ; C = 220 nF)

Quando a locomotiva foi deslocada para a posição média da linha, a tensão da terminação final da linha foi observada para ambas as condições (sem filtro e com filtro) e os oscilogramas da figura 7.10 ilustram esta condição.

Dos ensaios realizados, conclui-se que a questão da localização do filtro merecia um exame mais minucioso. Este estudo foi realizado através do programa de cálculo digital.

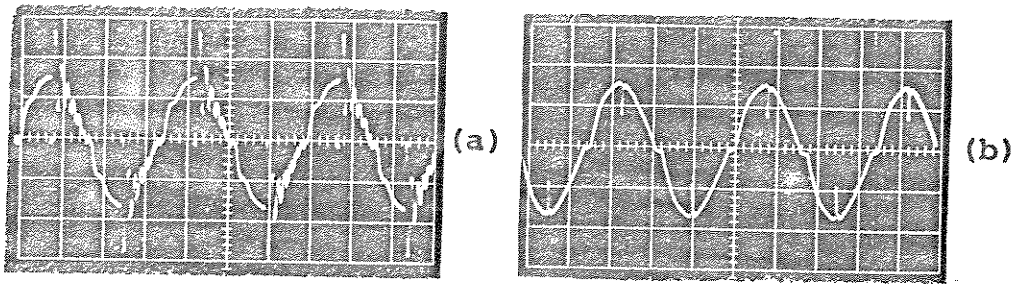


Figura 7.10: Tensão no final da linha (200 v/cm ; 5 ms/cm)
(a) sem filtro; (b) filtro no final da linha
Locomotiva localizada na posição média a linha

7.4.3 - Estudo do Alocação do Filtro

Conforme se verificou anteriormente, o programa de cálculo digital constitue-se em uma ferramenta importante para a detecção de sobretensões. Mas não foi implementado para que tivesse apenas esta finalidade. Com as alterações propostas no capítulo V, este programa passou também a ser instrumento muito útil para a tarefa de definição do local em que o filtro deve ser instalado. A finalidade deste item é mostrar como o programa pode ser utilizado na resolução deste problema.

Com este propósito, simulações foram realizadas no sentido de que fossem obtidas as tensões ao longo da linha, nas seguintes condições:

- inicialmente a linha foi dividida em 8 segmentos iguais (cada um deles representa 4 km). Em seguida, a locomotiva foi sucessivamente sendo colocada em cada uma das 9 posições disponíveis;
- a cada posição ocupada pela locomotiva, o filtro RC foi sendo sucessivamente colocado em cada uma das posições disponíveis ao longo da linha.

Através do programa digital foram calculados 9 valores de tensões para cada uma das posições ocupadas pela locomotiva. Gráficos mostrando estes resultados são apresentados nas figuras 7.11 a 7.13.

Um primeiro exame destes gráficos vem revelar que a variação da magnitude da tensão máxima calculada ao longo da linha, para uma dada posição da locomotiva, vai depender da posição em que se encontra colocado o filtro. É desejável que não haja muita variação do nível de tensão verificado nas diversas posições da linha. Isto dificultaria uma definição do nível de isolação a ser adotado para a mesma. Com relação, por exemplo, à figura 7.12, observe-se que quando o filtro é colocado na posição 2 (a locomotiva está na posição 4) a tensão máxima que se verifica na linha varia bastante quando é observada nas diversas posições, a partir da subestação.

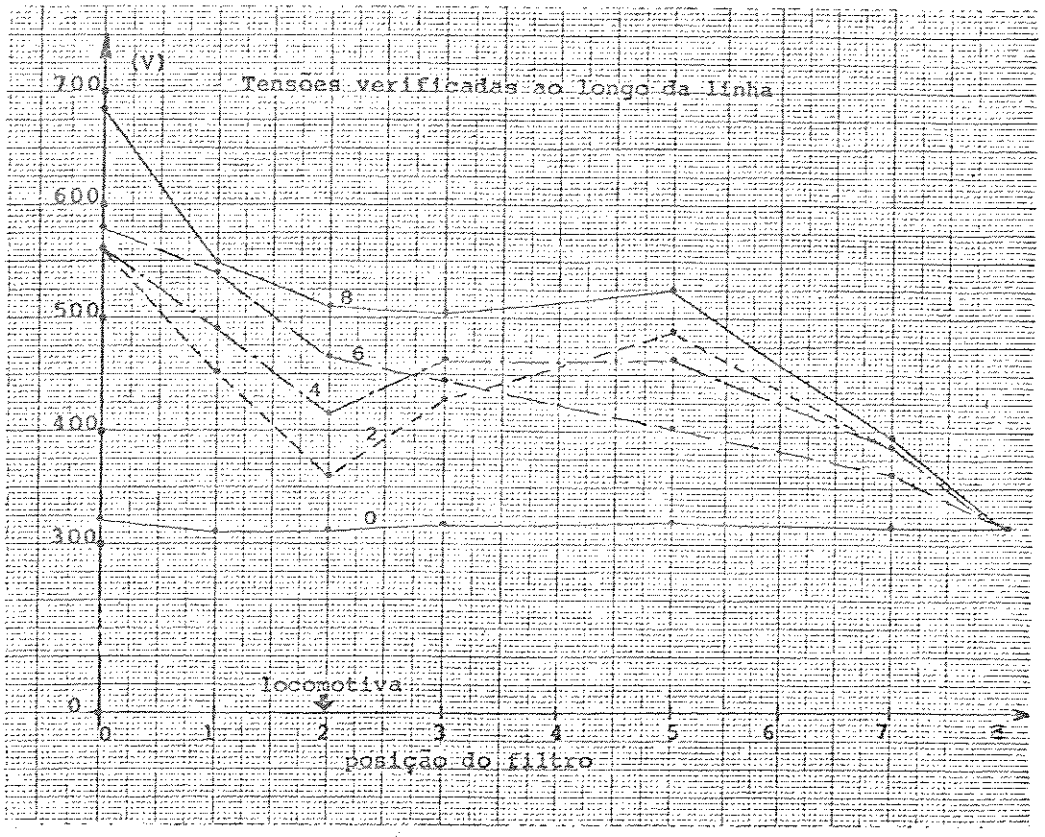


Figura 7.11: Tensões máximas verificadas nas posições 0, 2,..., 8 da linha em função da posição do filtro. Locomotiva na posição 2

Quando o filtro é deslocado para a posição 5, estando a locomotiva na posição 2 (refira-se à figura 7.11), a tensão máxima ao longo da linha também apresenta bastante variação. Este comportamento da tensão máxima foi também verificado através do simulador analógico. As figuras 7.14 (a) e 7.14 (b) resumem estas observações. De uma maneira geral, pode-se observar que quando o filtro se encontra nas posições da linha mais próximas da subestação, as tensões máximas verificadas ao longo da linha apresenta bastante variações em suas magnitudes. Conclui-se que é melhor instalar o filtro nas posições mais próximas do final da linha, quando a variação das magnitudes das tensões máximas é menor.

Já se observou anteriormente que as sobretensões que ocorrem na linha não tem origem interna. Os resultados apre-

sentados neste item vem coerentemente revelar que a instalação de um filtro na locomotiva não pode representar uma solução eficaz para a solução do problema. A menos que a locomotiva (equipada com um filtro) estivesse ocupando posições próximas da terminação final da linha, as sobretensões não seriam aliviadas.

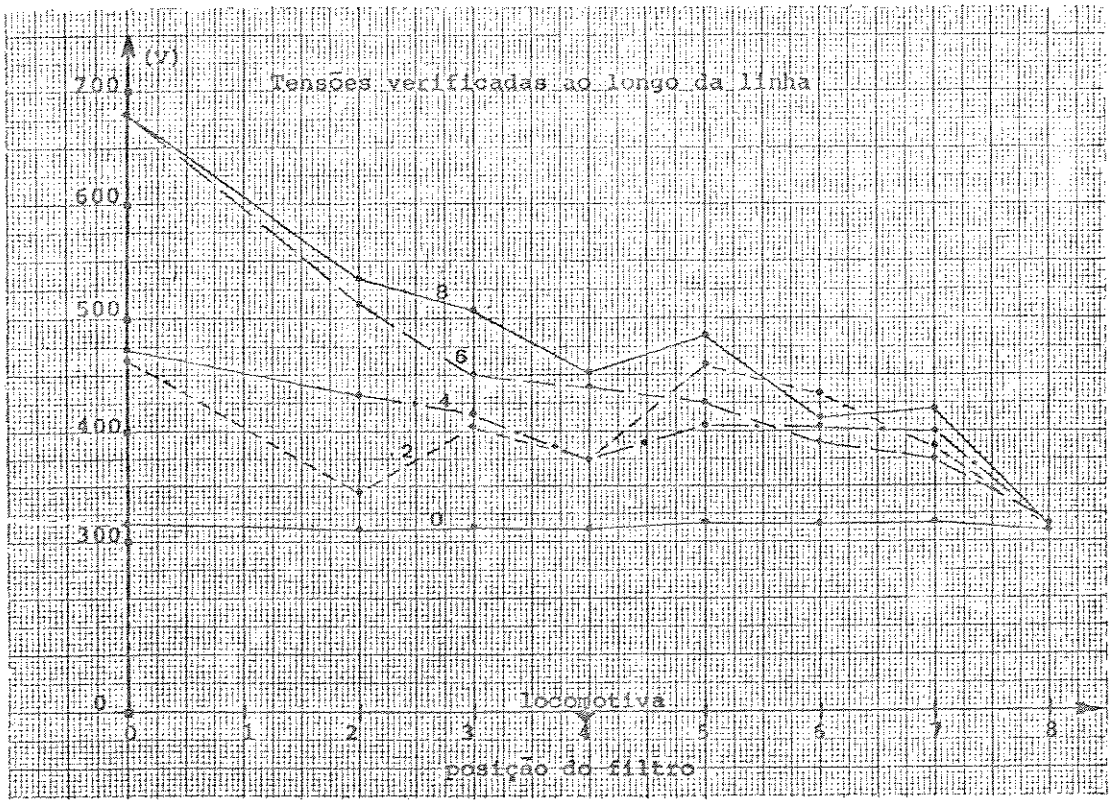


Figura 7.12: Tensões máximas verificadas nas posições 0, 2,...,8 da linha em função da posição do filtro. Locomotiva na posição 4

Como o problema está muito ligado à atuação da linha de alimentação, a alocação de filtros teve de ser decidida em função de um exame da ação da linha em presença de filtros sucessivamente instalados ao longo de seu comprimento.

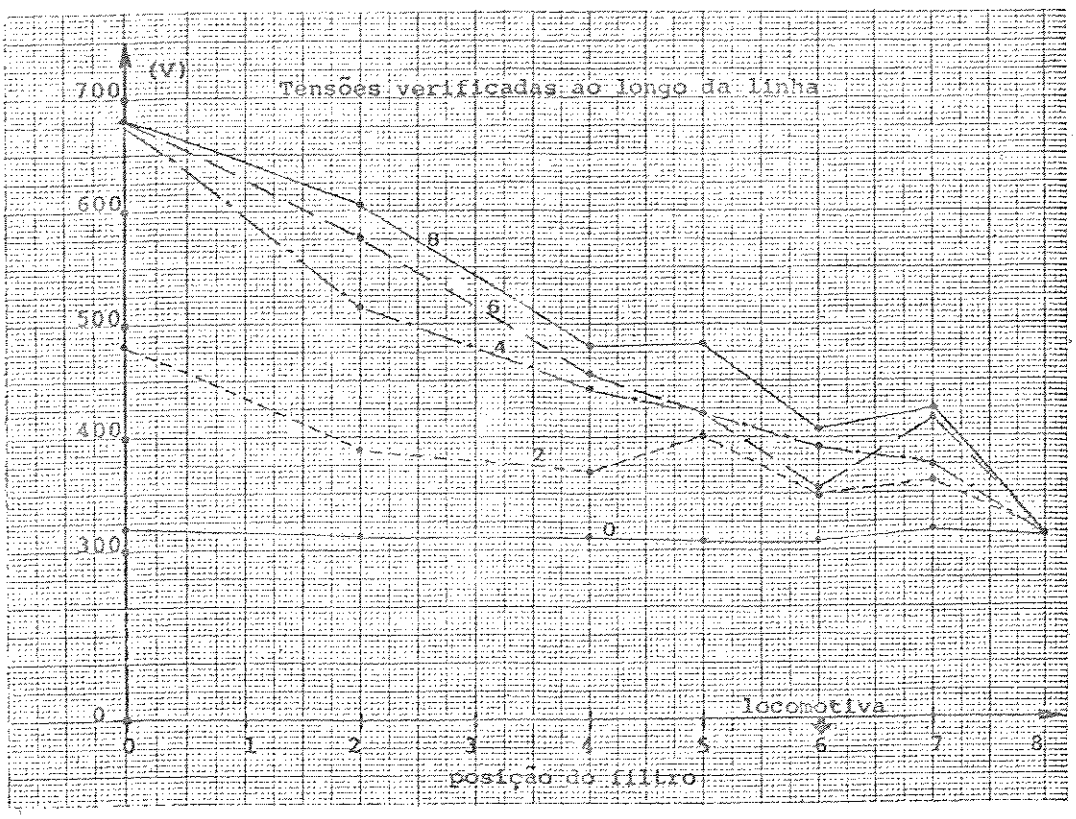


Figura 7.13: Tensões máximas verificadas nas posições 0, 2,..., 8 da linha em função da posição do filtro. Locomotiva na posição 6

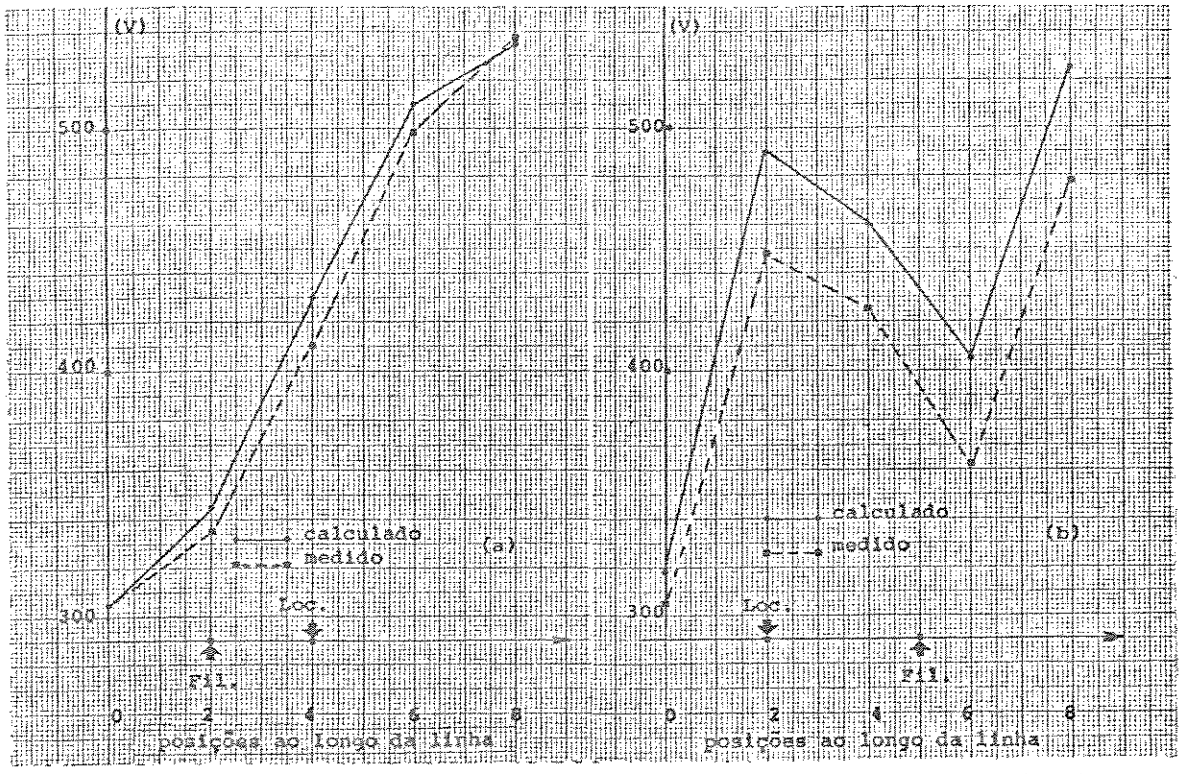


Figura 7.14: Tensões máximas observadas ao longo da linha nas posições indicadas: a) locomotiva na posição 4 e filtro na posição 2; b) locmotiva na posição 2 e filtro na posição 5

As figuras 7.15 e 7.16 apresentam outros resultados que também foram obtidos através do programa de cálculo digital. Neste caso, a localização do filtro já está decidida. Deseja-se averiguar o comportamento da tensão máxima verificada ao longo da linha, para o caso em que a locomotiva ocupa sucessivamente as diversas posições disponíveis. A figura 7.15 apresenta o caso em que o filtro está instalado na posição média da linha. Observe-se que, para este caso, a tensão da terminação final da linha (posição 8) é sempre a tensão mais alta verificada para qualquer posição da locomotiva.

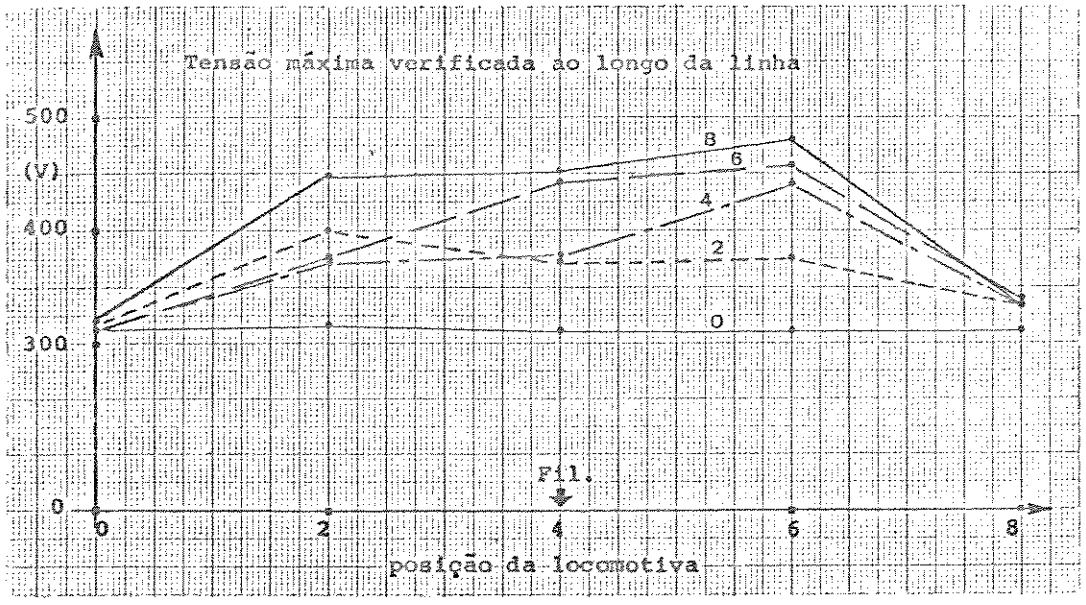


Figura 7.15: Tensões máximas na linha de contato
Filtro localizado na posição 4

Com relação à figura 7.16, se a locomotiva estiver na posição 2 (neste caso o filtro está na posição 6) os pontos a, b, c, e d representam, respectivamente, as tensões máximas verificadas na linha nas posições 0, 2, 4, 6 e 8. Assim, já se sabe que a terminação final da linha (posição 8) vai apresentar a tensão mais elevada que se observa para este caso. A segunda

tensão mais elevada será observada no pantógrafo da locomotiva (posição 2).

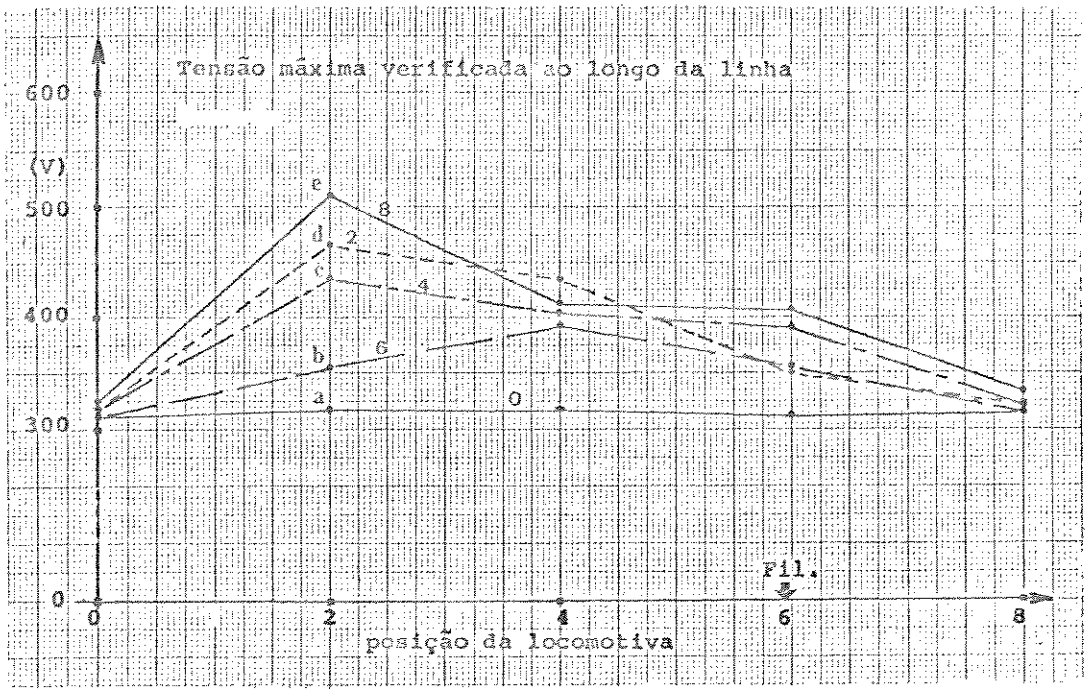


Figura 7.16: Tensões máximas na linha de contato
Filtro localizado na posição 6

Estes resultados são bastante interessantes para a definição do nível de isolação da linha e da própria locomotiva. Existe, no entanto, ainda uma outra consideração a fazer. Estas curvas permitem também a determinação do nível máximo de tensão a que uma outra locomotiva (operando em regime) poderia vir a estar submetida. Referindo-se à figura 7.16, por exemplo, se a locomotiva em processo de aceleração estiver localizada na posição 4, uma outra locomotiva que opere em regime, e que esteja localizada na posição 2, terá seu pantógrafo submetido a cerca de 465 V.

De cada uma das figuras 7.15 ou 7.16 (ou de figuras semelhantes traçadas para outras posições do filtro) podem ser obtidas 5 curvas diferentes (uma para cada posição da loco-

motiva) relacionando as tensões verificadas ao longo da linha.

7.4.4 - Definição de Parâmetros do Filtro pela Via Digital

Estando disponível um simulador analógico para o sistema de tração, este equipamento foi utilizado (item 7.4.2) em uma pesquisa experimental, a qual teve por objetivo determinar os valores dos parâmetros de um filtro RC que seria instalado na linha de alimentação. O programa de cálculo digital foi depois utilizado em outro estudo que visava determinar as posições ao longo da linha em que seria mais razoável fazer a instalação deste filtro. A conclusão de que o filtro deve ser instalado nas posições mais próximas do final do trecho da linha foi também confirmada através dos estudos feitos com o simulador. A preocupação que se tem neste item é a de não levar o leitor a concluir que a análise experimental, feita através do simulador, constitui-se na única forma pela qual estes parâmetros podem ser determinados. Neste sentido, mostrar-se-á que os parâmetros podem vir a ser determinados também pela via do cálculo digital.

Para abordar este problema pela via do cálculo digital, o programa computacional foi utilizado em uma análise de sensibilidade. Este estudo tem como objetivo verificar de que maneira o perfil de tensões máximas verificadas ao longo da linha é afetado por variações que sejam provocadas nos parâmetros do filtro.

Inicialmente foi feito um estudo de sensibilidade com relação à resistência ôhmica do filtro. Neste caso, a capacitância do mesmo permaneceu invariável.

A figura 7.17 apresenta os resultados de uma das pesquisas deste tipo realizadas. Neste exemplo, a locomotiva está na posição 4 (posição média da linha) e o filtro está instalado na terminação final da linha. Variações na resistência ôhmica do filtro foram produzidas (500 Ω a 10 kΩ) e as variações correspondentes das tensões máximas da linha foram calculadas.

Os resultados permitem concluir que o programa de cálculo digital oferece também subsídios para a determinação do valor mais razoável de resistência ôhmica que o filtro deve ter.

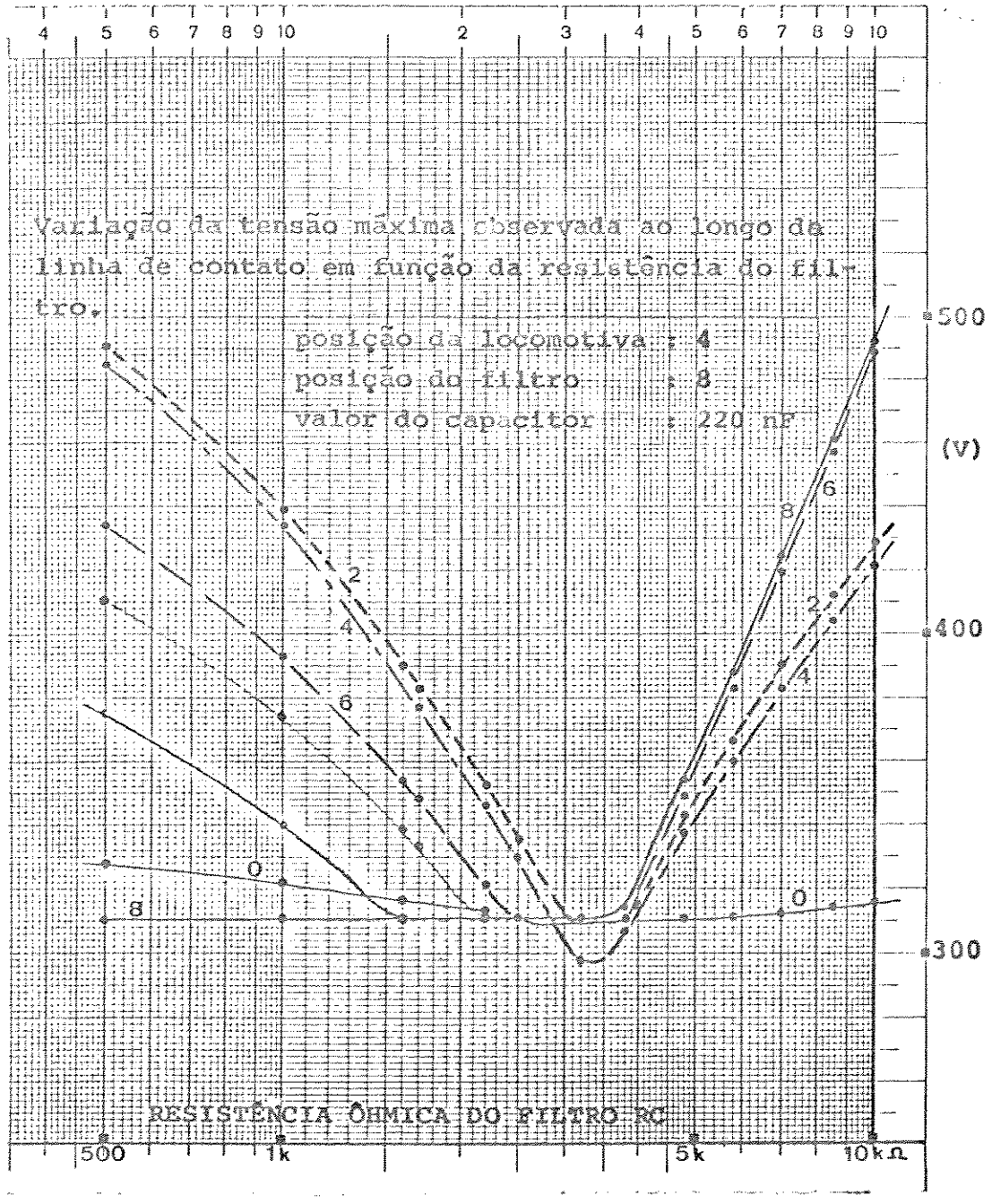


Figura 7.17: Sensibilidade da tensão máxima da linha em função do parâmetro de resistência do filtro

A figura 7.18 apresenta os resultados do estudo de sensibilidade realizado com a variação do valor de capacitância do filtro. Observa-se que é interessante a presença do capa-

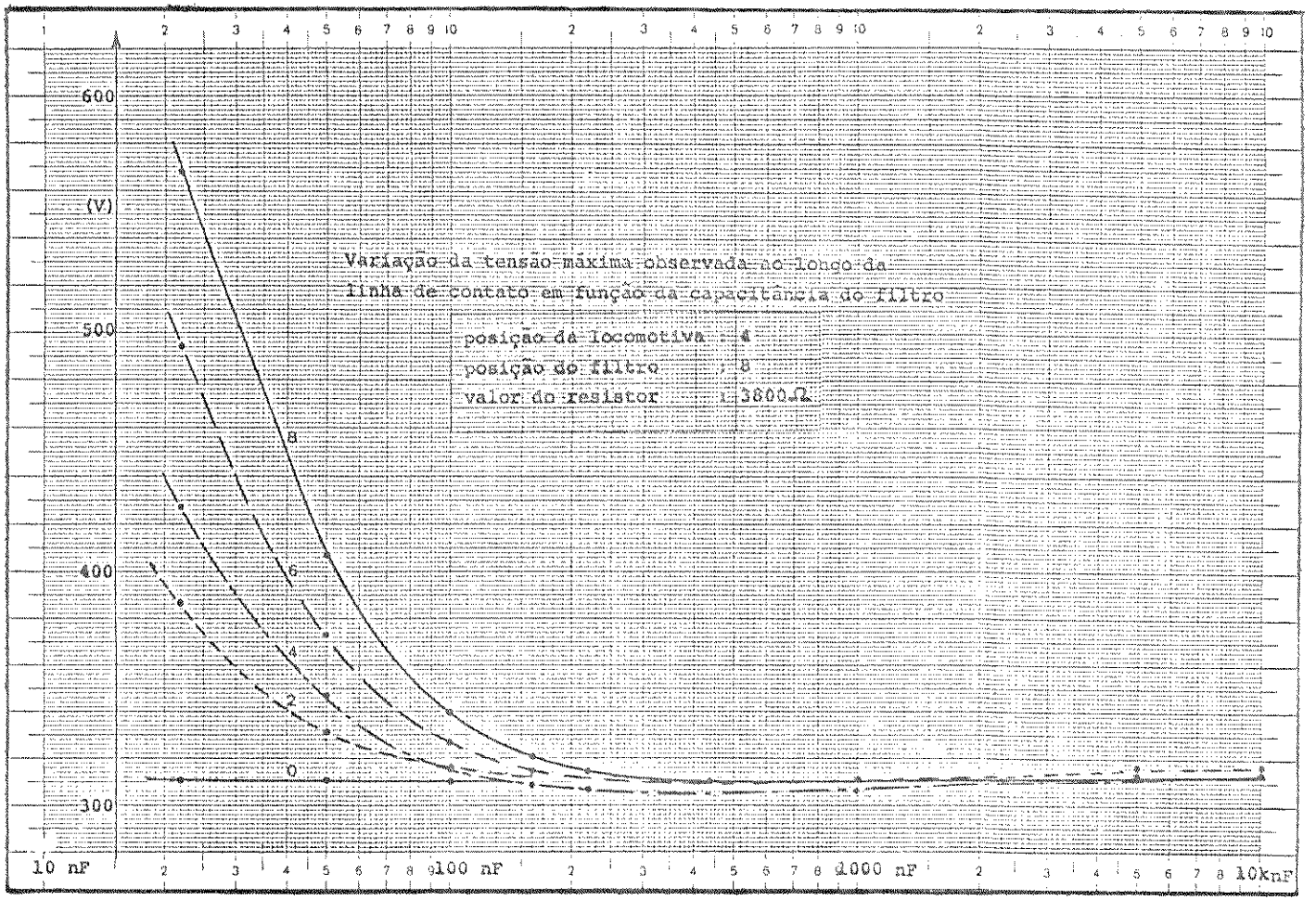


Figura 7.18 : Variação da tensão máxima verificada ao longo da linha de contato, em função da capacitância do filtro
0,2,4,6 e 8 : posições na linha

citor. Se a linha for terminada apenas pela resistência ôhmica, não é possível assegurar-se de que não serão observadas sobretensões na mesma.

Um outro exemplo em que a locomotiva está na posição 4 é apresentado na figura 7.19. Observe-se que o valor de resistência ôhmica necessário para que se consiga o mínimo de sobretensões deve ser determinado em função das localizações do filtro e da locomotiva.

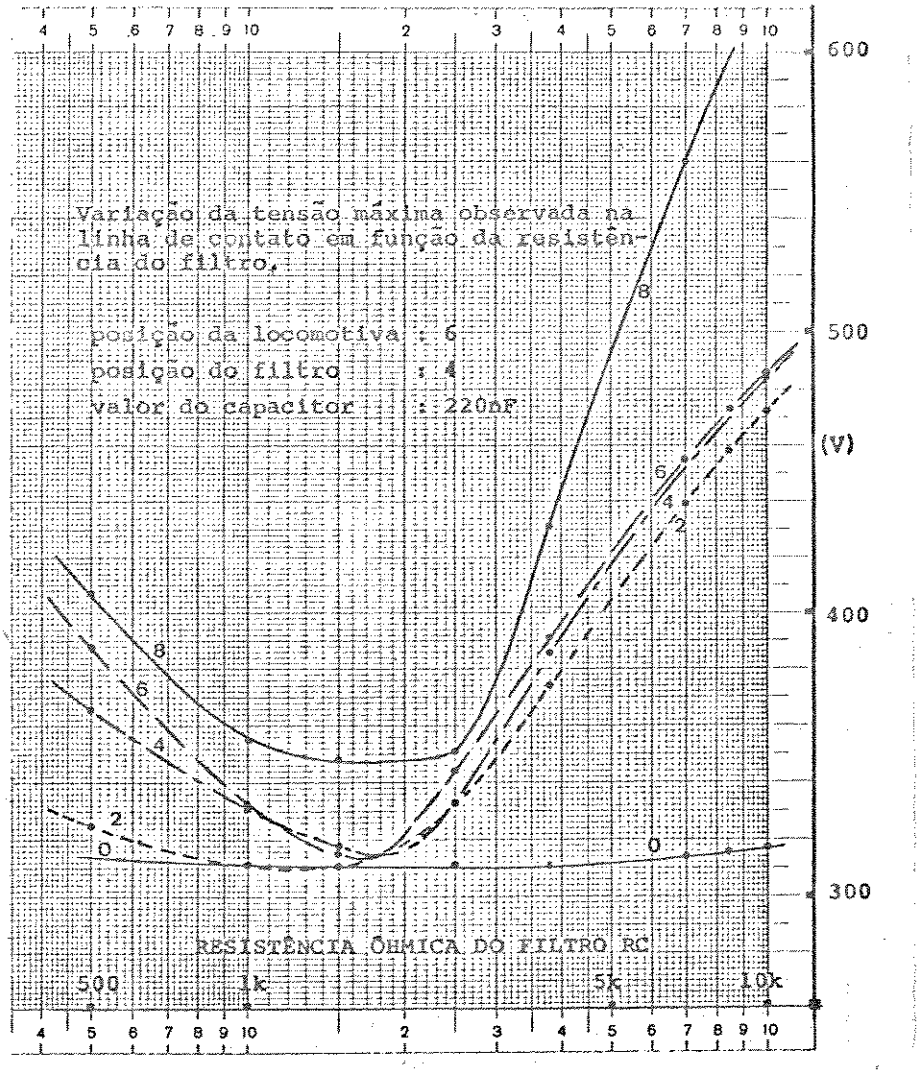


Figura 7.19: Sensibilidade da tensão máxima da linha em função do parâmetro de resistência do filtro

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Os resultados operacionais verificados, em diversos países, com os sistemas de tração elétrica alimentados com corrente alternada monofásica de frequência industrial, revelam a possibilidade de que a linha de contato venha a estar submetida a sobretensões, durante a fase de aceleração da locomotiva. Antes de mais nada, torna-se necessário que se disponha de um procedimento de análise através do qual se possa saber se este fenômeno será ou não verificado em um sistema que se deseja considerar. Para isto, será necessário que se proceda uma análise da tensão verificada ao longo da linha de contato, para os diversos modos de operação que o sistema admite. Este estudo, o qual vem constituir um dos objetivos principais deste trabalho, visa não apenas fazer a detecção da presença do fenômeno, como também avaliar a sua magnitude e caracterizar as circunstâncias nas quais o memso foi observado.

A abordagem do problema foi feita pelas vias da análise digital e da simulação analógica. No que se refere à análise digital, decidiu-se elaborar um algoritmo de cálculo de tensões baseado no método Schnyder-Bergeron. Este método é o mais adequado para o tratamento de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética, como é o caso das sobretensões. Quando utilizado pelo pessoal de análise de sistema de potência, o método calcula as magnitudes das variáveis nodais do sistema. No presente caso, como é imprescindível que se conheça a evolução das tensões, não apenas nas terminações da linha, mas também nos mais diversos pontos ao longo da mesma, procedeu-se uma adequação do método para que pudesse ser utilizado em mais esta apli-

cação. Estes desenvolvimentos estão detalhadamente explicados no capítulo IV. Em alguns casos é possível que se faça, sem muitas dificuldades, a análise da evolução da tensão da linha pelo método do diagrama de treliças. Trata-se de um exercício muito útil porque permite uma excelente visualização do desenvolvimento do fenômeno transitório no tempo. Os resultados obtidos com os dois métodos apresentam boa concordância. Algumas considerações sobre o algoritmo utilizado são apresentadas também no capítulo IV.

Assim, mediante um programa digital baseado no algoritmo descrito na figura 4.22, tornou-se possível calcular o perfil de tensões ao longo da linha, de onde é possível detectar a presença de picos de sobretensões. O programa está em condições de fornecer a magnitude das tensões, o instante em que foram observadas e as respectivas condições de operação. Na saída dos resultados, é possível optar-se pelo gráfico da tensão no tempo (como apresentado na figura 7.1) ou pela relação de tensões máximas observadas em cada ponto da linha. No primeiro caso, em que estão disponíveis, a cada instante, as magnitudes da tensão e da corrente em cada uma das posições ao longo da linha, estes dados podem ser analisados para que se conheça o conteudo de harmônicos da função que está sendo calculada. Com o programa de detecção de sobretensões, foram construidas e apresentadas curvas de tensão máxima verificada no pantógrafo da locomotiva. Assim, apurou-se a condição mais problemática para a locomotiva (veja-se a figura 7.2), sendo possível avaliar-se, da mesma forma, as condições em cada ponto da linha.

A outra forma de análise empregada foi a simulação analógica. Não existe hoje no país nenhum sistema de tração, do tipo mencionado, que esteja em operação. Este fato fez com que surgisse a necessidade de se implementar um modelo para o sistema de tração. Com o simulador construido, diversos aspectos relacionados a condições de operação, configuração de parâmetros, etc. puderam ser observados no osciloscópio. Mostrou-se, no capítulo VI, que o simulador apresenta uma potencialidade considerável. Diversos oscilogramas foram apresentados a partir da figura 6.13. Confrotando-se resultados calculados com resultados

correspondentes verificados no simulador, encontrou-se razoável correlação, apesar das diferenças de representação utilizadas nos dois modelos.

Um outro objetivo importante do trabalho refere-se à instalação de filtros para a redução de sobretensões. No capítulo V foram analisados as diversas configuraçãoes esperadas para o sistema, em relação à alocação de filtros. O programa computacional sofreu modificações para permitir a consideração desta nova condição. Duas questões foram abordadas:

- a localização do filtro
- a discussão de seus parâmetros

Com relação à alocação do filtro, o programa computacional foi utilizado para que produzisse curvas da tensão máxima verificada ao longo da linha, em função da localização do filtro, para uma dada localização da locomotiva. As figuras 7.11 a 7.13 mostram estas curvas de tensão calculadas para 5 posições diferentes da linha, Na verdade os cálculos efetuados permitem conhecer a tensão em 80 posições diferentes. Destas curvas podem ser tiradas importante conclusões a respeito da melhor localização do filtro. Outros dados relativos à proteção da linha também podem ser avaliados a partir das mesmas figuras.

Quanto aos parâmetros do filtro, foram levantadas curvas de sensibilidade da tensão da linha em função de variações produzidas na resistência e na capacitância do mesmo. Estas curvas, apresentadas nas figuras 7.17 e 7.19, permitem verificar quais valores de parâmetros do filtro podem ser escolhidos, para uma dada posição do mesmo e para uma dada localização da locomotiva.

Todos estes testes foram também analisados no simulador analógico, obtendo-se confirmação dos resultados. A proposito, o simulador permite que sejam feitos ensaios com quaisquer tipos de filtros. Conforme já se observou anteriormente, a decisão acerca das magnitudes dos parâmetros do filtro pode também estar condicionada a considerações a respeito de perdas. Is-

to significa que os valores dos parâmetros do filtro podem não ser aqueles que propiciam a maior redução dos picos de sobretensões. Um critério razoável seria alocar um filtro que reduzisse as sobretensões a um nível razoável, mas que ao mesmo tempo dissipasse um mínimo de energia. Este trabalho não tinha como objetivo chegar à definição completa dos parâmetros do filtro, até porque torna-se necessário antes chegar-se a uma definição do tipo de filtro a ser utilizado. Esta última definição pressupõe o conhecimento do problema que está sendo considerado. Ainda com relação aos filtros, é oportuno mencionar que sua utilização deve ser evitada, sempre que possível. Como a linha de contato opera usualmente com 25 kV (ou com 50 kV em alguns casos mencionados no capítulo I), a instalação de um filtro neste nível de tensão não constitui um problema trivial. Existem ponderações que devem ser feitas com relação a perdas e à complexidade do equipamento. Além disto, as repercussões de sua instalação, sobre o valor da frequência de ressonância do sistema, precisam ser avaliadas com cuidado. As discussões apresentadas emanaram de simulações analógicas e de cálculos digitais que não levam em conta estes aspectos do equipamento.

Na maioria das vezes operar-se-á sem filtros. Porisso é importante poder dispor-se de um algoritmo de cálculo de tensões para as diversas condições de operação. Assim, pode-se antever os níveis de tensão que serão observados quando o sistema estiver em operação.

Constituem contribuições principais características deste trabalho ao estudo em questão:

- a proposição de um modelo para o sistema de tração, através do qual seja possível efetuar-se o cálculo da tensão da linha de contato, durante a fase de aceleração da locomotiva;

- a elaboração de um programa de cálculo digital que viabilize a obtenção do perfil de tensões;

- a adequação deste programa aos casos em que exista um filtro instalado na linha;

- a implementação de um simulador analógico para o sistema. Este equipamento, ao que se supõe, não estava até agora disponível no país.

APÊNDICE I

Representação Digital do Ramo RL

No modelo para o sistema de tração elétrica, discutido no capítulo III, tanto a locomotiva quanto a subestação são representados através de um ramo RL. Para o processo de cálculo digital utilizado, no qual uma solução é obtida no instante t em função do instante $t - \Delta t$ anterior, torna-se necessário equacionar estes ramos de uma forma adequada ao desenvolvimento de cálculo.

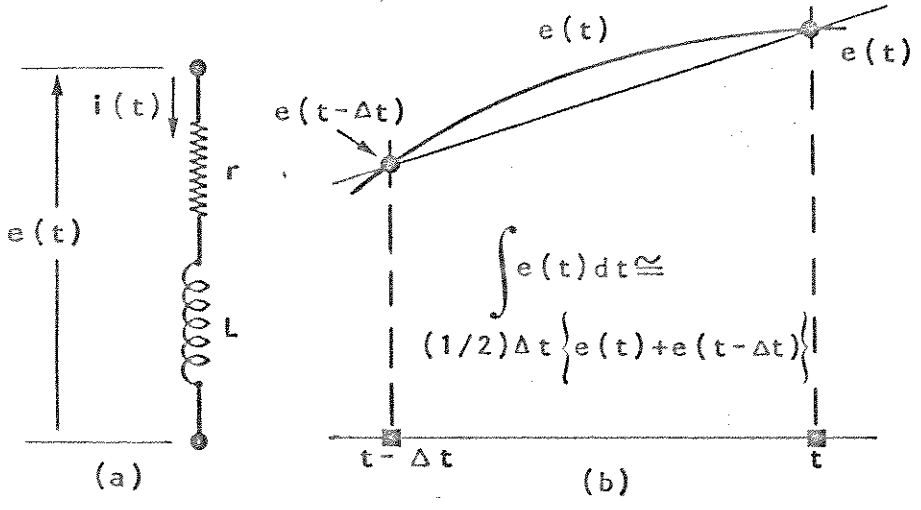


Figura I.1: Equacionamento digital do ramo RL

Da figura I.1 (a) vem:

$$e(t) = r\, i(t) + L \frac{d}{dt} i(t) \qquad (I.1)$$

a qual pode ser integrada no intevalo Δt. Conforme representado na figura I.1 (b), na integração da equação (I.1) as integrais das funções e(t) e i(t) podem ser avaliadas através da regra trapezoidal:

$$\int_{t-\Delta t}^{t} e(t)dt \simeq \frac{\Delta t}{2} \{e(t) + e(t - \Delta t)\} \qquad (I.2)$$

$$\int_{t-\Delta t}^{t} i(t)dt \simeq \frac{\Delta t}{2} \{i(t) + i(t - \Delta t) \qquad (I.3)$$

Assim, da integração da equação (I.1) vem resultar:

$$e(t) = (r + R)\ i(t) + E \qquad (I.4)$$

onde

$$R = \frac{2L}{\Delta t}$$

$$E = (r - R)\ i(t - \Delta t) - e(t - \Delta t)$$

A equação (I.4) tem a forma adequada para ser empregada no cálculo digital.

APÊNDICE II

Atualização dos valores de E_{2j} e E_{2j-1}

Considere-se o j-ésimo segmento representado na figura 4.2. Com base neste segmento foram escritas as equações (4.14), (4.15) e (4.16) abaixo reescritas com os números (II.1), (II.2) e (II.3), respectivamente

$$e[(j-1)d,t] = Z_1\, i[(j-1)d,t] - E_{2j-1}(t-\theta) \qquad (II.1)$$

$$e(jd,t) = -Z_1\, i(jd,t) - E_{2j}(t-\theta) \qquad (II.2)$$

onde

$$E_{2j-1}(t-\theta) = -e(jd,t-\theta) + Z_2\, i(jd,t-\theta) \qquad (II.3)$$

A equação (II.3) pode ser reescrita para o instante t [43]:

$$E_{2j-1}(t) = -e(jd,t) + Z_2\, i(jd,t) \qquad (II.4)$$

Combinando-se as equações (II.2) e (II.4) vem:

$$E_{2j-1}(t) = -\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) e(jd,t) - \frac{Z_2}{Z_1} E_{2j}(t-\theta) \qquad (II.5)$$

Através da equação (II.5), fazendo-se $j = 1,2,\ldots,n$ os valores de E_{2j-1} (todos com índices ímpares) no instante t podem ser obtidos a partir dos valores de E_{2j} (todos com índices pares) no instante $t - \theta$.

Trabalhando-se de forma análoga com o (j+1)-ésimo segmento (figura 4.3 (c)) obtém-se as equações (4.14'), (4.15') e (4.16') abaixo reescritas com os números (II.6), (II.7) e (II.8), respectivamente

$$e(jd,t) = Z_1\, i(jd,t) - E_{2j+1}(t - \theta) \qquad (II.6)$$

$$e\left[(j+1)d,t\right] = -Z_1\, i\left[(j+1)d,t\right] - E_{2(j+1)}(t - \theta) \qquad (II.7)$$

onde

$$E_{2(j+1)}(t - \theta) = -e(jd,t - \theta) - Z_2\, i(jd,t - \theta) \qquad (II.8)$$

De forma análoga, a equação (II.8) pode ser reescrita para o instante t' e a equação resultante pode ser combinada com a equação (II.6), resultando

$$E_{2(j+1)}(t) = -\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) e(jd,t) - \frac{Z_2}{Z_1} E_{2j+1}(t - \theta) \qquad (II.9)$$

Através da equação (II.9), com $j=0,1,\ldots,n-1$, os valores de $E_{2(j+1)}$ (todos com índices pares) no instante t podem ser obtidos a partir dos valores de E_{2j+1} (todos com índices ímpares) no instante $t - \theta$.

APÊNDICE III

Representação Digital do Ramo RC

Nos desenvolvimentos apresentados no Capítulo V, um filtro RC é utilizado. O equacionamento deste ramo na forma apropriada para o cálculo digital é apresentado neste Apêndice.

Referindo-se à figura III.1, a seguinte equação pode ser escrita:

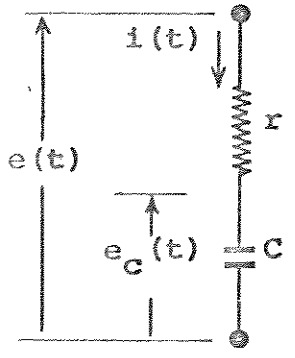


Figura III.1: Equacionamento digital do ramo RC

$$\frac{1}{C} i(t)dt = d\ e\ (t) = d\left[e(t) - r\ i(t)\right] \qquad \text{(III.1)}$$

integrando-se esta equação no intervalo $(t - \Delta t, t)$, obtém-se:

$$\frac{\Delta t}{2C}\{i(t) + i(t - \Delta t)\} = e(t) - e(t - \Delta t) - r\ i(t) + r\ i(t - \Delta t) \qquad \text{(III.2)}$$

Da equação (III.2) resulta:

$$e(t) = (r + R)\, i(t) + E \qquad \text{(III.3)}$$

onde

$$E = e(t - \Delta t) + (R - r)\, i(t - \Delta t) \qquad \text{(III.4)}$$

com

$$R = \frac{\Delta t}{2C} \qquad \text{(III.5)}$$

No programa digital, o ramo RC será sempre representado através da equação (III.3).

REFERÊNCIAS

[1] Tessier, Marcel; "Traction électrique et thermo-électrique"; Éditions Scientifiques Riber; Paris, 1978.

[2] Cabrita, Carlos Manuel Pereira; "Os diferentes sistemas de tração eléctrica e sua classificação"; Electricidade - Revista Científica e Tecnológica Portuguesa, nº 161; março 1981, pp. 117.125.

[3] Garreau, Marcel; "La traction électrique"; Éditions Scientifiques Riber; Paris, 1965.

[4] Cabrita, Carlos Manuel Pereira; "Evolução das locomotivas monofásicas de frequência industrial"; Electricidade - Revista Científica e Tecnológica Portuguesa, nº 164; junho 1981, pp. 270-283

[5] Moser, R.; "A Comparative study of the various types of electric traction motor in their specific fields of applications"; Brown Boveri Rev., nº 12, 1978, pp. 795-810.

[6] Stemmler, H. e Jager, A.; "Influence of GTO thyristors on electronic drive systems for traction vehicles"; Brown Boveri Rev.; nº 12, 1984, pp. 558-566.

[7] "Tendenze Evolutive della trazione monofase"; Rivista Ansaldo, nº 3, 1978, pp. 54-60.

[8] "Dalle reti primarie ai motori delle locomotive"; Tecnologia d'avanguardia - Finmeccanica; nº 1, aprile 1982, pp. 40-42.

[9] Moraes, Cícero Couto; "Estudos sobre aplicações de máquinas elétricas em tração ferroviária"; Tese de doutoramento apresentado à Escola Politécnica da USP, dezembro, 1982.

[10] Middleton, William D.; "When the steam railroads electrified"; Kalmbach Books; Milwaukee, USA 1974.

[11] "Electrifying the economic triangle"; Railway Gazette International; October 1981.

[12] "Projeto básico de eletrificação da Estrada de Ferro Ponta da Madeira - Carajás"; Amza-Ptel/Electra; 1980.

[13] "Relatório Final do Projeto de Eletrificação do trecho Barra Mansa a Manoel Feio"; Hidroservice - Engenharia de Projetos Ltda.; vol. 1, São Paulo, 1976.

[14] "Retomada das obras da Ferrovia do Aço", artigo da Revista Ferrovia da Associação dos Engenheiros da EFSJ; ano 51, nº 106, Jan.-Fev. 1986.

[15] Ruegg, R.; "The regenerative brakes of the thyristor locomotive Ee 3/3 II of the Swiss Federal Railways"; Brown Boveri Rev.; nº 12, 1975, pp. 554-557.

[16] Markham, J.D.; "AC thyristor controlled vehicles"; Anais do GEC Symposium on Developments in Electric Traction; Londres; março de 1976; pp. 1-9.

[17] Winkler, K.; "Abnormal operating conditions in controlled Single-phase rectifier circuits and preventive measures"; Brown Boveri Rev.; nº 56, 11-12, 1969, pp.589-596.

[18] Baldwin, D., "Total system concepts for AC traction". Anais do GEC Symposium on Developments in Electric Traction; Londres; março de 1976; pp. 21-27.

[19] Rawle, D.L.; "Recent developments in traction machines"; ibid; pp. 57-64.

[20] Tierney, J.R. and Turner, R.J.; "Improvement of the booster transformer/return conductor method of supressing

50 Hz interference from AC - electrified railway systems"; IEE Proc., vol. 128 Pt B; nº 1, Jan. 1981.

[21] Cabrita, C.M.P.; "Comando da fase e comando por sectores. Conteúdo harmônico da tensão continua e análise da comutação dos motores de tracção"; Electricidade - Revista Científica e Tecnológica Portuguesa; nº 198; abril de 1984, pp. 148-154.

[22] Cabrita, C.M.P.; "Conversores monofásicos de potência. Cálculo e análise dos factores de potência"; Electricidade - Revista Científica e Tecnológica Portuguesa, nº 199, maio 1984, pp. 198-204.

[23] Partab, H.; "Modern Electric Traction" (livro), Pritam Surat and Bros, New Delhi 1973.

[24] Morrison, R.E. and Barlow, M.J.; "Continuous overvoltages on A.C. traction systems"; IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems; Vol. PAS-102; nº 5; May 1983; pp. 1211-1217.

[25] Miskulin, M.S.; Souza, C.R. e Milanez, D.L.; "Análise e estimação de parâmetros de um sistema retificador - motor de corrente contínua com aplicação em tração elétrica"; Anais do X Congreso Panamericano de Ingenieria Mecanica, Electrica y Ramas Afines, Buenos Aires - Argentina; Outubro de 1984 (Anais sem numeração de página).

[26] Howroyd, D.C.; "Public-supply-system distortion and unbalance from single-phase A.C. traction", Proc. IEE, vol. 124, nº 10, October 1977, pp. 853-859.

[27] Hardell, Alexander; "Experiences with harmonics in electrical supply networks", CIRED 1985 - 8th International Conference on Electricity Distribution, May 1985, Brighton, UK; pp. 98-102.

[28] Morrison, R.E. and Stuart, M.; "Harmonic overvoltages on 50 kV traction systems"; International Conference on Harmonics in Power Systems; UMIST, England, September 1981.

[29] Souza, C.R. e Miskulin, M.S.; "Simulador analógico para avaliação do comportamento transitório da linha de alimentação de um sistema monofásico de tração elétrica controlada a tiristores"; Anais do 5º Congresso Brasileiro de Automática/1º Congresso Latino Americano de Automatica; vol. I, pp. 338-343; Campina Grande, PB, Setembro 1984.

[30] Littler, G.E.; "The performance of on A.C. electrified railway system at harmonic frequencies"; Supplement to Electrical Energy Conference, 1979.

[31] Yacamini, R., Hamould, O.A.R and Afacan, O.; "Modelling of traction load distortion in electricity supply systems"; IEE Proc., Vol. 128 Pt.B; nº 3, May 1981; pp. 149-156.

[32] Graf, R.; "Problems associated with the phase-angle control of locomotives in contact wire networks"; Brown Boveri Rev.; nº 12, 1977, pp. 761-766.

[33] Bewley, L.V. ; "Traveling waves on transmission systems"; Dover Publications, Inc., New York, 1963.

[34] Bickford, J.P.; Mullineux, N. and Reed, J.R.; "Computation of power system transients"; IEE Monograph Series 18; Published by Peter Peregrinus Ltd.;London 1976.

[35] Dommel, H.W. and Meyer, W.S.; "Computation of electromagnetic transients"; Proc. IEEE, vol. 62, nº 7, July 1974, pp. 983-993.

[36] Dommel, H.W.; "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks";

Proc. IEEE, vol. PAS-88; nº 4, April 1969, pp. 388-398.

[37] Frey, W. and Althammer, P.; "The calculation of electromagnetic transients on lines by means of digital computer"; Brown Boveri Rev.; vol. 48; nº 5/6, 1961, pp. 344-355.

[38] Joger, A.; Baechler, U. and Brom, B.; "Measures for improving the grid response of thyristor controlled traction vehicles"; Brown Boveri Rev.; nº 12; 1973; pp. 501-525.

[39] West, Brian (GEC Traction Limited, Manchester - Inglaterra); "Comunicação privada".

[40] Lopes, A.; Chiquito, J.G. e Waldman, H.; "Relações entre amplitude e fase em sistemas lineares realizáveis"; Relatório Técnico RT-83 do Convênio UNICAMP-TELEBRAS; junho de 1981.

[41] Stout, D.F. and Kaufman, M.; "Handbook of Operational Amplifier Circuit Design"; Mc Graw-Hill Book Company, 1976.

[42] Zwahlen, R. and Bohli, W.U.; "Design concept of electronic control systems for traction vehicles with phase-angle control", Brown Boveri Rev.; nº 12, 1975.

[43] Branin Jr., F.H.; "Transient analysis of lossless transmission lines"; Proc. IEEE, vol. 55, November 1967, pp. 2012-2013.