TESE
600

ROBSON CELSO PIRES

COMPENSAÇÃO NÃO-CONVENCIONAL DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ORIENTADOR: Prof. Renato de Aquino Faria Nunes

CO-ORIENTADOR: Prof. João Roberto Cogo

Trabalho de Dissertação Apresentado a Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá como Parte dos Requisitos para Obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Itajubá, Dezembro de 1989

CLASS. 621.315.1 (043.2)
CUTT. P667c
VOLUME 600

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

20-6-90		
19-6-91		
14-7-90		
02/09/91		
10/10/91		
08/7/93		
04.4.94		
18-01-99		
25-01-99		
01/02/99		
08/02/99		
17-6-99		

621.315.1(043.2)
P667c
600

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 2252 - 05/01/1917

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação Compensação Não-Convencional de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica.

Autor: ROBSON CELSO PIRES

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	
4º	A+	

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovado com distinção.

Observações:

Itajubá, 16 de Fevereiro de 1990.

Dr. José Antonio Jardini
THEMAG
1º Examinador

Engº José Carlos Sili Salomão
ELETROBRÁS
2º Examinador

Prof. Rubens Dario Fuchs
EFEI
3º Examinador

Prof. Renato de Aquino F. Nunes
EFEI
4º Examinador - Orientador

Campus Prof. José Rodrigues da Silva — Av. BPS, n.o 1303 — Bairro Pinheirinho
37.500 - ITAJUBÁ (MG) - Tel.: (035) 622-1966 e 622-1510

Aos meus pais,

Ao meu irmão e família,

À minha espôsa e filha,

Viviane e Niele

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor, Dr. Renato de Aquino Faria Nunes, orientador dedicado e atento, colega e amigo nos momentos difíceis.

- Ao Professor, Dr. Antonio Eduardo Hermeto, que sempre demonstrou confiança e entusiasmo pelo nosso trabalho.

- A todos os colegas e amigos do Instituto de Engenharia Elétrica, os meus sinceros agradecimentos pelo estímulo demonstrado, em especial, ao Professor Rubens Dario Fuchs, que sempre me honrou com a sua experiência.

- À todos os funcionários do Centro de Processamento de Dados (CPD), sempre prestativos e amáveis no desempenho de suas funções.

- Ao amigo, Willians César da Silva, responsável pelos trabalhos de datilografia, pela motivação demonstrada.

- Ao Sr. Argemiro dos Santos, executor dos desenhos constantes em nosso trabalho.

- Aos colegas, César Fernandes Pereira e Fernando Piazza, co-autores do Programa - PLINTRA, cujas primeiras rotinas foram escritas durante a realização do curso - CESE - "Curso de Especialização em Sistemas Elétricos", ELETROBRÁS/EFEI, 1985.

- À minha família, pelo tempo que ficou privada do meu convívio, em especial, ao meu Pai, cujo apoio foi indispensável para a conclusão deste trabalho.

- À cidade de Itajubá, que me acolheu como se fosse seu filho.

RESUMO

A presente dissertação de mestrado objetiva contribuir para a solução do problema de transmissão de energia elétrica, em regime permanente, por linhas muito longas. O trabalho apresentado começa por calcular os parâmetros relevantes de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica e estabelecer a solução para as equações de propagação num sistema de multi-condutores. Em seguida, são efetuados alguns estudos de compensação de linhas por métodos convencionais, incluindo sob tal designação as compensações em derivação, em série e a compensação mista.

Finalmente o trabalho descreve detalhadamente os princípios e métodos de cálculo envolvidos com o que, aqui, se convencionou designar por compensação não convencional, que incorpora a compensação para meia-onda, a compensação para regime característico e a compensação por compensadores estáticos e comenta os resultados relevantes obtidos.

S I M B O L O G I A

$\dot{\underline{\underline{Z}}}$ - Matriz de impedâncias longitudinais de uma linha de transmissão.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_c$ - Matriz de impedâncias próprias dos condutores.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_g$ - Matriz de impedâncias mútuas face à existência de uma terra perfeita.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_t$ - Matriz de correção de Carson.

$\dot{\underline{\underline{Y}}}$ - Matriz de admitâncias transversais de uma linha de transmissão.

$\underline{\underline{P}}$ - Matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell.

$\underline{\underline{C}}$ - Matriz de capacitâncias de uma linha de transmissão.

$\underline{V}$ - Vetor de tensões.

$\underline{I}$ - Vetor de correntes.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_R$ - Matriz de impedâncias reduzidas de uma linha de transmissão.

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_R$ - Matriz de admitâncias reduzidas de uma linha de transmissão.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_{012}$ - Matriz de impedâncias sequenciais.

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{012}$ - Matriz de admitâncias sequenciais.

$\dot{\underline{\underline{\psi}}}$ - Matriz das constantes de propagação.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_c$ - Matriz de impedâncias características.

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_c$ - Matriz de admitâncias características.

$\dot{\underline{\underline{A}}}$ - Matriz de constante $\dot{A}$ de uma linha.

$\dot{\underline{\underline{B}}}$ - Matriz da constante $\dot{B}$ de uma linha.

$\dot{\underline{\underline{C}}}$ - Matriz da constante $\dot{C}$ de uma linha.

$\dot{\underline{\underline{D}}}$ - Matriz da constante $\dot{D}$ de uma linha.

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{in}$ - Matriz de admitâncias de entrada do sistema de transmissão no seu terminal emissor.

$\dot{\underline{\underline{\gamma}}}$ - Matriz diagonal dos valores próprios de $\dot{\underline{\underline{\psi}}}$

$\dot{\underline{\underline{C}}}_{kj}$ - Matriz conexão representativa de um ponto de transposição.

Y_o - Admitância natural ou admitância de surto.

Z_o - Impedância natural ou impedância de surto.

ω - Frequência angular.

Kd - Grau da compensação em derivação.

Ks - Grau da compensação em série.

λ - Comprimento de onda de propagação.

θ_c - Ângulo de compensação.

P_c - Potência característica.

$\dot{\underline{V}}^f_E$ e $\dot{\underline{I}}^f_E$ - Vetores das tensões e correntes no terminal emissor da linha.

$\dot{\underline{V}}^f_R$ e $\dot{\underline{I}}^f_R$ - Vetores das tensões e correntes no terminal receptor da linha.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_{cg}$ e $\dot{\underline{\underline{Y}}}_{cg}$ - Matrizes de impedânicas e admitâncias de carga.

$\dot{\underline{\underline{K}}}_v$ e $\dot{\underline{\underline{K}}}_i$ - Matrizes dos coeficientes de reflexão das tensões e correntes.

$\dot{\underline{\underline{T}}}$ e $\dot{\underline{\underline{T}}}^{-1}$ - Matrizes transformação de componentes simétricas e sua inversa.

$\dot{\underline{\underline{Q}}}$ e $\dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1}$ - Matriz modal de Ψ e sua inversa.

$\dot{\underline{\underline{P}}}_k$ e $\dot{\underline{\underline{P}}}_j$ - Matrizes de disposição de fase nos trechos k e j adjacentes a um ponto de transposição.

ÍNDICE

PAG.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais..... 2

1.2 - Estado da Arte..... 3

1.3 - Estrutura da Dissertação..... 5

CAPÍTULO 2 - A LINHA DE TRANSMISSÃO COMO UM SISTEMA DE MULTI-CONDUTORES: PARÂMETROS E EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

2.1 - Cálculo dos Parâmetros das Linhas Aéreas de Transmissão. 8

2.1.1 - As Impedâncias Longitudinais da Linha de Transmissão e as Equações Diferenciais para as Tensões..... 8

2.1.2 - As Admitâncias Transversais da Linha de Transmissão e as Equações Diferenciais para as Correntes..... 16

2.1.3 - As Equações Diferenciais Reduzidas..... 19

2.1.4 - As Componentes Simétricas dos Parâmetros de Linhas Aéreas de Transmissão..... 22

2.2 - Caracterização da Linha de transmissão a ser Estudada... 25

2.3 - Os Parâmetros Calculados..... 27

CAPITULO 3 - A SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PROPAGAÇÃO NUM SISTEMA DE MULTI-CONDUTORES

3.1 - Introdução..... 44

3.2 - A Forma Exponencial da Solução das Equações de Propagação..... 45

3.2.1 - Tensões e Correntes Fixadas na Emissão..... 48

3.2.2 - Tensões e Correntes Fixadas na Recepção..... 49

3.2.3 - Tensões Fixadas na Emissão e Carga Conhecida na Recepção. A Solução Via Matriz dos Coeficientes de Reflexão - $\underline{\underline{K}}_V$..... 50

3.3 - A forma Hiperbólica da Solução das Equações de Propagação..... 55

3.4 - O Sistema de N Condutores como um Quadripolo..... 55

3.5 - A Solução Numérica Via Transformação Modal..... 56

3.5.1 - Tensões e Correntes Fixadas na Emissão..... 61

3.5.2 - Tensões e Correntes Fixadas na Recepção..... 62

3.5.3 - As Constantes do Quadripolo Equivalente..... 63

3.6 - Uma Aplicação: Representação de Transposições e Análise de Desequilíbrios..... 63

3.6.1 - Incorporação das Condições Impostas pelas Transposições às Equações do Quadripolo Representativo da Linha..... 66

3.6.2 - Influência das Transposições..... 74

CAPITULO 4 - COMPENSAÇÃO CONVENCIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

4.1 - Introdução..... 79

4.2 - Tipos de Compensação e Natureza dos Parâmetros..... 79

4.3 - Compensação em Derivação..... 86

4.3.1 - Cálculo dos Parâmetros da Compensação por Indutores em Derivação..... 87

4.3.2 - Análise de Alguns Resultados Relevantes..... 88

4.4 - A Compensação em Série..... 91

4.4.1 - Cálculo dos Parâmetros da Compensação por Capacitores em Série..... 92

4.4.2 - Análise de Alguns Resultados Relevantes..... 94

4.5 - A Compensação Mista..... 98

4.5.1 - Cálculo dos Parâmetros da Compensação por Capacitores em Série e Indutores em Derivação..... 98

4.5.2 - Análise de Alguns Resultados Relevantes..... 99

4.6 - Conclusões..... 103

CAPÍTULO 5 - COMPENSAÇÃO NAO CONVENCIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

5.1 - Introdução..... 106

5.2 - A Compensação para Meia-Onda..... 107

5.2.1 - Cálculo dos Parâmetros da Compensação para Meia-Onda..... 108

5.2.2 - As Tensões e as Correntes nas Linhas de Transmissão em Meia-Onda..... 113

5.2.3 - Análise de Alguns Resultados Relevantes..... 117

5.2.4 - Utilização de Algumas Medidas Operativas para Melhorar o Desempenho da Linha de Meia-Onda..... 126

5.3 - A Compensação para Potência Caracaterística..... 130

5.3.1 - Cálculo dos Parâmetros da Compensação para Potência Característica..... 130

5.4 - Conclusões..... 135

CAPÍTULO 6 - A COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

6.1 - Introdução..... 138

6.2 - A Descrição do Modelo e o Equacionamento Utilizados..... 138

6.3 - Análise de Alguns Resultados Relevantes..... 143

6.4 - Conclusões..... 150

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES GERAIS 152

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 157

ANEXO I - A MATRIZ DE ADMITÂNCIAS NODAIS REPRESENTATIVA DE UM SISTEMA QUE UTILIZA COMPENSADORES ESTÁTICOS

I.1 - Introdução..... 163

I.2 - A Matriz $\dot{\underline{\underline{Y}}}_{BUS}$ do Sistema Compensado..... 166

ANEXO II - A DEFINIÇÃO DO JACOBIANO DE UM SISTEMA QUE UTILIZA COMPENSADORES ESTÁTICOS

II.1 - Introdução..... 169

II.2 - Funções Residuais Derivadas do Controle do Módulo de Tensão..... 169

II.3 - Funções Residuais Derivadas das Perdas Ativas Nulas nas Fontes de Tensão de Referência..... 170

II.4 - Funções Residuais Derivadas do Balanço de Potência..... 171

II.5 - As partições Matriciais do Jacobiano..... 176

ANEXO III - MANUAL DO PROGRAMA - PLINTRA
(PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

III.1- Introdução..... 180

III.2- Fluxograma do Programa - "PLINTRA"..... 181

III.3- Cálculo dos Parâmetros..... 183

III.4- Restrições do Programa - "PLINTRA"..... 183

III.5- Dados de Entrada..... 183

III.6- Arquivo de Dados - ARQØ5..... 185

III.7- Execução do Programa - "PLINTRA"..... 193

III.8- Saída de Dados..... 195

ANEXO IV - MANUAL DO PROGRAMA - CLINTRA
(COMPENSAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

IV.1 - Introdução..... 197

IV.2 - Fluxograma do Programa - "CLINTRA"..... 198

IV.3 - Cálculo das Tensões e Correntes..... 200

IV.4 - Restrições do Programa - "CLINTRA"..... 200

IV.5 - Dados de Entrada/Arquivo de Dados - ARQØ2..... 201

IV.6 - Execução do Programa - "CLINTRA"..... 219

IV.7 - Saída de Dados..... 220

ANEXO V - MANUAL DO PROGRAMA - CELINTRA
(COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

V.1 - Introdução..... 222

V.2 - Fluxograma do Programa - "CELINTRA"..... 223

V.3 - Restrições do Programa - "CELINTRA"..... 225

V.4 - Dados de Entrada/Arquivo de Dados - ARQØ5..... 225

V.5 - Execução do Programa - "CELINTRA"..... 230

V.6 - Saída de Dados..... 230

ANEXO VI - MANUAL DO PROGRAMA - PLOTTER
(TRAÇADOR DE CURVAS)

VI.1 - Introdução..... 233

VI.2 - Estruturação do Programa - "PLOTTER"..... 233

VI.3 - Restrições do Programa - "PLOTTER"..... 234

VI.4 - Entrada de Dados/Execução do Programa..... 234

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O potencial energético existente na região Norte do País faz crer que esta região se transforme, a médio e longo prazos, numa região não só consumidora bem como exportadora de energia para outras regiões sócio-economicamente mais evoluídas, tais como as regiões Nordeste, Sudeste e Sul. O transporte do excedente de energia para estas últimas regiões envolverá, invariávelmente, distâncias superiores a 2000 km . Se tal transporte for feito através da utilização de linhas de transmissão de energia elétrica, os estudos de viabilidade contemplarão inevitávelmente duas alternativas distintas: a transmissão em corrente contínua, a tensões de ± 600 kV ou superiores, e a transmissão em corrente alternada, em muito alta tensão, em alguns casos superiores a 1000 kV. Face às distâncias envolvidas na transmissão CA , uma das primeiras decisões a ser tomada diz respeito ao tipo de compensação utilizado, de modo a garantir um desempenho adequado da linha numa faixa razoável de potências transmitidas. Assim, tomando como exemplo, a eventual existência de uma das usinas na bacia do Rio Xingu (UHE - Monte Belo), as distâncias envolvidas na transmissão para as regiões Nordeste e Sudeste seriam aproximadamente da ordem de 2000 a 2800 km . Desta forma, o presente trabalho contribui para a análise de uma das soluções que vem sendo estudada pelo

setor elétrico brasileiro, que seria a utilização de um tipo de compensação não convencional. O primeiro tipo de compensação não convencional estudado é aquele capaz de permitir operar as linhas na faixa do meio comprimento de onda, solução esta atrativa face às distâncias supra-mencionadas serem próximas, a 60 Hz, do meio comprimento de onda de propagação. Somente por este aspecto os investimentos em equipamentos de compensação, quando necessários, seriam mínimos se comparados com outros tipos de compensação convencional. Tal fato resulta numa diminuição substancial dos custos da transmissão.

Associados aos problemas identificados na fase dos estudos em regime permanente da linha de transmissão em meia-onda natural ou compensada para tal, propõe-se o segundo tipo de compensação não convencional, ou seja, a compensação para potência característica que permite, além de suprir cargas situadas ao longo da rota da linha, equilibrar as tensões que resultam naturalmente desequilibradas em linhas que não utilizam transposições de condutores, ou ainda, equilibrar as tensões de linha face à alimentação de cargas com elevado grau de desequilíbrio entre fases.

1.2 - Estado da Arte

As distâncias mencionadas anteriormente limitam a aplicação das tecnologias apresentadas no sub-ítem anterior a países cujas dimensões territoriais se assemelham às do Brasil. Ficam descartados ainda os países cuja fonte maior de energia primária não se baseia na hidráulica. Assim sendo, os primeiros trabalhos publicados em revistas de circulação internacional, e que tratam

sobre a transmissão de energia elétrica por linhas muito longas, foram os constantes na referência (27), que por sua vez, constituí-se de uma coleção de trabalhos que analisam os diversos aspectos da transmissão em meia-onda, quer em regime permanente, quer em regime transitório de funcionamento, sendo este último, na sua maioria, de natureza eletromecânica.

As contribuições constantes nas referências (11, 12 e 13), de um modo geral, correspondem às análises de desempenho das linhas de comprimento natural igual ao meio comprimento de onda ou compensadas para tal. Tais análises se desenvolvem segundo a orientação de bem definir o comportamento da linha em regime permanente sob várias condições de funcionamento. De realçar, os perfis de tensões e correntes ao longo da linha para diferentes valores e natureza da carga, os valores das perdas na transmissão face à variação da carga, a ocorrência de curto-circuitos e seus efeitos ao longo da linha, entre outros.

Uma primeira análise comparativa de custos entre a transmissão de energia em corrente contínua e em corrente alternada, esta última compensada para meia-onda, pode ser encontrada na referência (15). De realçar na referência (14), as análises que se desenvolvem sobre o releamento da linha de meia-onda.

Mais recentemente, a referência (26) traz relevantes contribuições no que concerne à proposta de um modelo que permite quantificar as perdas por Corona em linhas de transmissão em muito alta tensão. Assim, os resultados obtidos tornaram possível concluir que as perdas por Corona limitam drásticamente as sobretensões sustentadas que aparecem na linha, não obstante tal efei

to limitar ainda a potência transmitida e afetar a estabilidade do sistema.

Todos os estudos acima mencionados partiram da pressuposição de que o componente linha de transmissão corresponde a um sistema perfeitamente equilíbrado. Assim sendo, quase nenhuma referência se fez em relação às implicações técnicas ou de natureza econômica, necessárias para operar tal sistema com um grau aceitável de desequilíbrios nas grandezas de tensão e corrente nos terminais da linha. Outro aspecto restritivo à transmissão de energia por linhas de meia-onda, e ainda não estudado adequadamente, corresponde a alimentação de cargas intermediárias, o que significa que a linha de meia-onda, em princípio, só se presta para a transmissão de energia ponto a ponto. Assim sendo, contribuições no sentido de tentar contornar as dificuldades acima podem ser encontradas, ainda que parcial e resumidamente, na referência (25). Estas últimas, entre outras alternativas, constituem-se num dos principais objetivos a serem atingidos nesta dissertação.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Pode-se considerar que o trabalho que se encontra descrito nesta Dissertação de Mestrado se divide em quatro partes distintas:

- A primeira inclui os capítulos 2 e 3 que calculam, respectivamente, os parâmetros das linhas aéreas de transmissão e apresenta a solução das equações de propagação num sistema de multi-condutores em regime permanente. Como aplicação imediata, apresenta-se a modelagem da transposição de condutores ao longo das linhas.

- A segunda, constituída pelo capítulo - 4, foi incluída no trabalho de modo a torná-lo didaticamente auto-suficiente. Esta parte apresenta alguns estudos relativos às compensações por indutores em derivação, capacitores em série e estas duas últimas formas de compensação aplicadas simultaneamente, ou seja, a compensação mista convencional. Tais estudos são desenvolvidos somente em regime permanente, devendo ressaltar-se desde já que o dimensionamento da compensação exige também a realização de estudos transitórios eletromagnéticos e/ou eletromecânicos, que no entanto fogem ao objetivo principal desta dissertação.

- A terceira, constituída pelos capítulos 5 e 6, analisa os princípios em que se baseia a compensação aqui chamada de não convencional - compensação para meia-onda e compensação para potência característica (capítulo - 5), e a compensação da linha através da utilização de compensadores estáticos (capítulo - 6). Estes capítulos apresentam resultados e conclusões relevantes obtidos em análise de regime permanente.

- A quarta parte, constituída pelo capítulo de conclusões, faz o resumo das principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho e apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, este trabalho conta ainda com 6 (seis) Anexos que descrevem alguns desenvolvimentos indispensáveis a uma boa compreensão de várias formulações apresentadas nos capítulos principais da dissertação. Do terceiro ao último anexo, apresentam-se os Manuais do Usuário de quatro programas computacionais desenvolvidos durante a dissertação.

C A P I T U L O 2

A LINHA DE TRANSMISSÃO COMO UM SISTEMA DE MULTI-CONDUTORES

PARÂMETROS E EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

CAPÍTULO 2

A LINHA DE TRANSMISSÃO COMO UM SISTEMA DE MULTI-CONDUTORES: PARÂMETROS E EQUACÕES FUNDAMENTAIS

2.1 - Cálculo dos Parâmetros das Linhas Aéreas de Transmissão

O método utilizado para efeito de cálculo dos parâmetros das linhas aéreas de transmissão[1,2] é genérico e pode processar qualquer número de circuitos, independentemente do número de condutores por fase e cabos de guarda existentes. A única restrição ao processamento de um tal número de circuitos é imposta pelas facilidades computacionais disponíveis.

2.1.1- As Impedâncias Longitudinais da Linha de Transmissão e as Equações Diferenciais para as Tensões

As impedâncias longitudinais dos N condutores da linha de transmissão podem se apresentar sob a forma de uma matriz, de dimensão (N x N), denominada Matriz de Impedâncias Longitudinais, $\underline{\dot{Z}}$, cujos elementos da diagonal, $\dot{Z}_{ii}$, representam as impedâncias próprias, por unidade de comprimento, do condutor i, já incorporado o efeito do retorno pela terra, e cujos elementos fora da diagonal, $\dot{Z}_{ik}$, representam as impedâncias mútuas, por unidade de comprimento, entre os condutores i e k. Portanto, a referida matriz é simétrica.

Assim, três efeitos importantes são superpostos para o cálculo da matriz $\dot{\underline{\underline{Z}}}$. O primeiro, considera as características dos condutores; o segundo, está associado à disposição geométrica que os condutores ocupam na configuração básica das estruturas face ao retôrno perfeito das correntes pela terra, e o terceiro e último, incorpora os efeitos devidos ao retorno por uma terra imperfeita, considerados através de correções na matriz $\dot{\underline{\underline{Z}}}$, tal como proposto por Carson[3]. Desta forma, $\dot{\underline{\underline{Z}}}$ é expressa pela seguinte equação:

$$\dot{\underline{\underline{Z}}} = \dot{\underline{\underline{Z}}}_c + \dot{\underline{\underline{Z}}}_g + \dot{\underline{\underline{Z}}}_t \quad [\text{ohm/km}] \qquad (2.1)$$

onde,

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_c$ - Matriz de impedâncias próprias dos condutores, em ohm/km;

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_g$ - Matriz de impedâncias mútuas face a existência de uma terra perfeita, em ohm/km;

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_t$ - Matriz de correção de Carson, em ohm/km.

a) Cálculo das impedâncias próprias dos condutores - $\dot{\underline{\underline{Z}}}_c$

A metodologia adotada permite o cálculo destas impedâncias em função de certas faixas de frequências utilizadas:

- Frequências industriais (50 ou 60 hertz):

O termo $\dot{Z}_{cii} = R_{cii} + jX_{cii}$ calcula-se a partir das expressões:

$$R_{cii(t_2)} = R \cdot (T + t_2)/(T + 25) \qquad (2.2)$$

onde:

$R_{c_{ii}(t_2)}$ - Resistência do cabo para a temperatura t_2, em ohm/km;

R - Resistência de cabo a 25°C, em ohm/km;

t_2 - Temperatura de operação da linha, em °C;

T - Constante que depende do tipo de material do cabo.

1. cobre recozido → T = 234,5
2. cobre, têmpera dura → T = 241
3. alumínio, têmpera dura → T = 228

e,

$$X_{c_{ii}} = 4\pi \cdot f \cdot \text{Ln}\,(r/r') \qquad (2.3)$$

onde:

$X_{c_{ii}}$ - Reatância própria do condutor i, em ohm/km;

f - Frequência do sistema, em hertz;

r - Raio externo nominal do cabo, em metros;

r' - Raio médio geométrico do cabo, em metros.

- Frequência iguais ou superiores a 2 - 5 kilo-hertz:

A incorporação do efeito pelicular é feita segundo a formulação descrita na referência (2), o que fornece partes resistiva e reativa iguais e calculadas por:

$$R_{cii} = X_{cii} = [(2{,}25 \cdot \rho|m|)/(\sqrt{2} \cdot r'' \cdot (n+2) \cdot \pi)].1000 \qquad (2.4.a)$$

para m definido como: $m = \sqrt{j\,(2\pi \cdot f \cdot \mu)/\rho}$ (2.4.b)

onde:

R_{cii} - Resistência do condutor i, em ohm/km;

X_{cii} - Reatância do condutor i, em ohm/km;

ρ - Resistividade do material que constitui o condutor, em ohm/km;

f - Frequência do sistema, em hertz;

n - Número de filamentos da última camada do condutor;

r" - Raio do filamento da última camada do condutor;

μ - Permeabilidade magnética do material do condutor, em V. s/A . km.

b) Cálculo das impedâncias devidas às disposições geométricas dos condutores - $\dot{\underline{\underline{Z}}}_g$

A parte resistiva dos elementos desta matriz é sempre nula e a parte reativa é calculada pelas fórmulas:

- Elementos da diagonal

$$X_{g_{ii}} = 4\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \text{Ln} (2 H_i / r) \qquad (2.5)$$

- Elementos fora da diagonal

$$X_{gik} = 4\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \text{Ln} (D_{i_k} / d_{i_k}) \qquad (2.6)$$

onde:

$X_{g_{ii}}$ e X_{gik} - Reatâncias, em ohm/km;

f - Frequência do sistema, em hertz;

r - Raio externo nominal do cabo, em metros;

D_{ik} - Distância do condutor i a imagem do condutor k, em metros;

d_{ik} - Distância do condutor i ao condutor k, em metros.

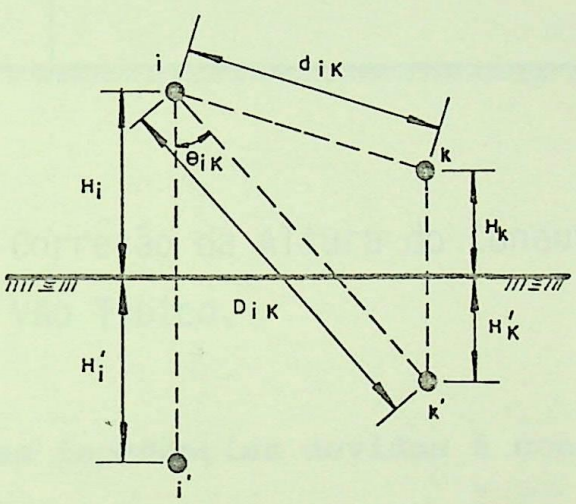


FIGURA 2.1 - Dois Condutores Suspensos sobre o Solo e suas Imagens.

A variação da altura dos condutores ao longo dos vãos pode ser compensada através de correções que podem ser introduzidas nos cálculos através da seguinte equação:

$$H_i = h_i - 0,7 \cdot f_i \qquad (2.7)$$

onde:

h_i - Altura do ponto de suporte do condutor i, em metros;

f_i - Flecha do condutor i para o vão típico, em metros;

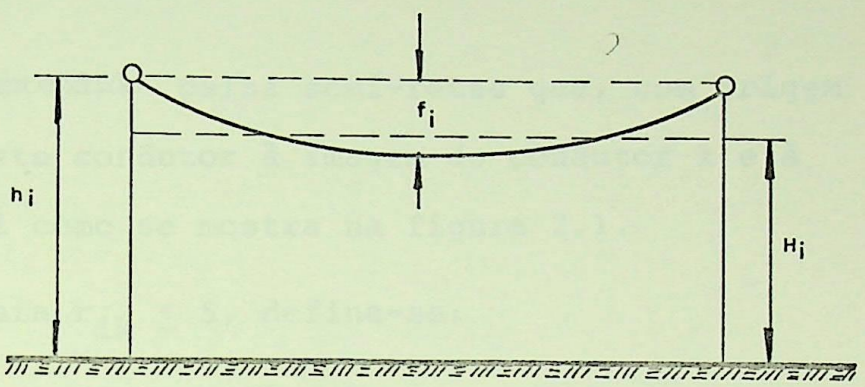


FIGURA 2.2 - Correção da Altura do Condutor para o Vão Típico.

c) Cálculo das impedâncias devidas à contribuição do retorno imperfeito pela terra - $\dot{\underline{Z}}_t$

A correção imposta às componentes resistiva e reativa de $\dot{\underline{Z}}$, face à presença de uma terra imperfeita, é calculada mediante utilização das séries infinitas desenvolvidas por Carson[3]. As componentes real e imaginária da correção, R_t e X_t, respectivamente, são expressas em função das variáveis r_{ik} e θ_{ik}, sendo

$$r_{ik} = \sqrt{(2\pi \cdot f \cdot \mu/\rho') \cdot D_{ik}} \qquad (2.8)$$

onde:

f - Frequência do sistema, em hertz;

μ - Permeabilidade magnética do material que constitui o condutor, em V . s/A . m;

ρ' - Resistividade do solo, em ohm . m;

D_{ik} - Distância do condutor i a imagem do condutor k, em metros;

e θ_{ik} é o ângulo subtendido pelas semi-retas que, com origem no condutor i, unem este condutor à imagem do condutor k e à sua própria imagem, tal como se mostra na figura 2.1.

Assim, para $r_{ik} \leq 5$, define-se:

$$P_{ik} = \frac{\pi}{8} \cdot (1-S_4) + \frac{1}{2} \operatorname{Ln}\left(\frac{2}{\gamma \cdot r_{ik}}\right) \cdot S_2 + \frac{1}{2} \cdot \theta_{ik} \cdot S_2' - \frac{\sigma_1}{\sqrt{2}} + \frac{\sigma_2}{2} + \frac{\sigma_3}{\sqrt{2}} \qquad (2.9)$$

$$Q_{ik} = \frac{1}{4} + \frac{\operatorname{Ln}\left(\frac{2}{\gamma \cdot r_{ik}}\right) \cdot (1-S_4)}{2} - \frac{\theta_{ik} \cdot S_4'}{2} + \frac{\sigma_1}{\sqrt{2}} - \frac{\pi \cdot S_2}{8} + \frac{\sigma_3}{\sqrt{2}} - \frac{\sigma_4}{2} \qquad (2.10)$$

onde, γ=1,7811 (constante de Euler), e S_2, S_2', $S_4 \cdot S_4'$, σ_1, σ_2, σ_3 e σ_4 são as séries infinitas de Carson, constantes na referência (2).

Entretanto, para $r_{ik} > 5$, tem-se:

$$P_{ik} = \frac{\cos\theta_{ik}}{\sqrt{2} \cdot r_{ik}} - \frac{\cos 2\theta_{ik}}{r_{ik}^2} + \frac{\cos 3\theta_{ik}}{\sqrt{2} \cdot r_{ik}^3} +$$

$$+ 3 \cdot \frac{\cos 5 \cdot \theta_{ik}}{\sqrt{2} \cdot r_{ik}^5} \qquad (2.11)$$

$$Q_{ik} = \frac{\cos \theta_{ik}}{\sqrt{2} \cdot r_{ik}} - \frac{\cos 3\ \theta_{ik}}{\sqrt{2} \cdot r_{ik}^{3}} + \frac{3.\cos 5\ \theta_{ik}}{\sqrt{2}\ \cdot\ r_{ik}^{5}} \qquad (2.12)$$

Finalmente,

$$R_{tik} = 2 \cdot P_{ik} \cdot \omega \cdot \mu/2\pi \qquad (2.13)$$

$$X_{tik} = 2 \cdot Q_{ik} \cdot \omega \cdot \mu/2\pi \qquad (2.14)$$

onde,

ω - frequência angular, em rad/s.

Uma vez conhecida a matriz, $\underline{\dot{Z}}$, de impedâncias longitudinais da linha, as equações de regime permanente para as quedas de tensão, por unidade de comprimento dos N condutores, são expressas por:

$$\begin{bmatrix} d\dot{V}_1/dx \\ d\dot{V}_2/dx \\ \vdots \\ d\dot{V}_N/dx \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \cdots & \dot{Z}_{1N} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \cdots & \dot{Z}_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{N1} & \dot{Z}_{N2} & & \dot{Z}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} \qquad (2.15)$$

ou em forma compacta

$$\frac{d\,\underline{\dot{V}}\,(x)}{dx} = - \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}}\,(x)$$

onde,

$\dot{\underline{\underline{Z}}}$ - Matriz de Impedâncias longitudinais da linha de transmissão, em ohm/km;

$\dot{\underline{I}}(x)$ - Vetor das correntes nos N condutores;

$d\dot{\underline{V}}(x)/dx$ - Vetor das primeiras derivadas das tensões nos N condutores.

2.1.2- As Admitâncias Transversais da Linha de Transmissão e as Equações Diferenciais para as Correntes

As admitâncias transversais dos N condutores do sistema também podem se apresentar sob a forma de matriz, de dimensão (N x N), denominada Matriz de Admitâncias Transversais, $\dot{\underline{\underline{Y}}}$, cujos elementos da diagonal, $\dot{y}_{ii}$, representam a soma das admitâncias existentes, por unidade de comprimento, entre o condutor i e os demais condutores, e entre o condutor i e a terra. Os elementos de fora da diagonal, $\dot{y}_{ik}$, representam o valor negativo da admitância existente entre os condutores i e k. A matriz $\dot{\underline{\underline{Y}}}$, é simétrica e, em geral, a parte real de seus elementos, a condutância, é desprezada, enquanto a parte imaginária, a susceptância, é calculada a partir da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell, $\underline{\underline{P}}$. Os elementos de $\underline{\underline{P}}$ são calculados em função das características dielétricas do meio e da disposição geométrica dos condutores nesse meio, através das fórmulas [4]:

- Elementos da diagonal: Coeficientes de potencial próprios,

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \cdot \mathrm{Ln} \frac{2H_i}{r} \qquad (2.16)$$

- Elementos fora da diagonal: Coeficientes de potencial mútuos;

$$p_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \cdot \text{Ln} \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \qquad (2.17)$$

A matriz de capacitâncias do sistema, $\underline{\underline{C}}$, calcula-se agora por

$$\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{P}}^{-1} \qquad [F/km] \qquad (2.18)$$

e finalmente a matriz de admitâncias é dada por

$$\underline{\underline{Y}} = j\,\omega\,\underline{\underline{C}} \qquad [\text{siemens/km}] \qquad (2.19)$$

Nestas equações:

ω - Frequência angular do sistema, em rad/s;

r - Raio externo nominal do cabo, em metros;

ε - Permissividade dielétrica do vácuo ($\varepsilon = 8{,}859 \times 10^{-9}$), em A.s/V.m;

D_{ik} - Distância do condutor i a imagem do condutor k, em metros;

d_{ik} - Distância do condutor i ao condutor k, em metros;

H_i - Altura, corrigida ou não, do condutor i para o vão típico em metros, vide equação 2.7.

Assim, determinada a matriz, $\dot{\underline{\underline{Y}}}$, de admitâncias transversais da linha, as equações que representam as variações das correntes em regime permanente, por unidade de comprimento dos N condutores, expressam-se por:

$$\begin{bmatrix} d\dot{I}_1/dx \\ d\dot{I}_2/dx \\ \vdots \\ d\dot{I}_N/dx \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{y}_{11} & \dot{y}_{12} & \cdots & \dot{y}_{1N} \\ \dot{y}_{21} & \dot{y}_{22} & \cdots & \dot{y}_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{y}_{N1} & \dot{y}_{N2} & \cdots & \dot{y}_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \qquad (2.20)$$

que sob forma compacta representa-se por

$$\frac{d\dot{\underline{I}}(x)}{dx} = - \dot{\underline{\underline{Y}}} \cdot \dot{\underline{V}}(x)$$

onde,

$\dot{\underline{\underline{Y}}}$ - Matriz de Admitâncias transversais da linha de transmissão, em siemens/km;

$\dot{\underline{V}}$ - Vetor das tensões nos N condutores;

$d\dot{\underline{I}}(x)/dx$ - Vetor das primeiras derivadas das correntes nos N condutores.

2.1.3- As Equações Diferenciais Reduzidas

As equações 2.15 e 2.20 permitem, uma vez impostas condições de contorno adequadas, o cálculo das tensões e correntes em *todos* os condutores do sistema e a qualquer distância de uma origem definida arbitrariamente.

Em termos práticos, no entanto, é possível constatar que o cálculo das tensões e das correntes relativas aos cabos de guarda e aos sub-condutores de fase só têm interêsse num número muito restrito de estudos. Então, por uma questão de simplicidade e eficiência, seria conveniente trabalhar com equações reduzidas que, muito embora forneçam apenas os valores das tensões e das correntes nos condutores equivalentes de fase, sejam capazes de incorporar os efeitos resultantes da presença dos cabos de guarda e da existência de vários sub-condutores por fase.

a) A redução da matriz $\dot{\underline{\underline{Z}}}$

A redução da matriz de impedâncias longitudinais da linha de transmissão, $\dot{\underline{\underline{Z}}}$, pode ser desenvolvida através da forma inversa da equação 2.15, isto é,

$$\dot{\underline{I}}(x) = - \dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1} \cdot \frac{d\,\dot{\underline{V}}(x)}{dx} \qquad (2.21)$$

que pode ser escrita, em forma expandida, como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{I}}_c(x) \\ \dot{\underline{I}}_g(x) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{y}}}'_{cc} & \dot{\underline{\underline{y}}}'_{cg} \\ \dot{\underline{\underline{y}}}'_{gc} & \dot{\underline{\underline{y}}}'_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{d\,\dot{\underline{V}}_c(x)}{dx} \\ \frac{d\,\dot{\underline{V}}_g(x)}{dx} \end{bmatrix} \qquad (2.22)$$

onde os índices c e g referem-se aos condutores de fase e aos cabos de guarda respectivamente, e, $\dot{\underline{\underline{y}}}'_{cc}$, $\dot{\underline{\underline{y}}}'_{cg}$, $\dot{\underline{\underline{y}}}'_{gc}$ e $\dot{\underline{\underline{y}}}'_{gg}$ são partições matriciais de $\dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1}$.

Ao se considerar cabos de guarda multi-aterrados, portanto sob um potencial nulo ao longo de toda a linha de transmissão, e que as correntes nesses cabos são irrelevantes, à frequência industrial, as linhas e colunas de $\dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1}$, correspondentes aos cabos de guarda, são eliminadas.

Uma vez que os sub-condutores por fase estão submetidos a um mesmo potencial, as colunas de $\dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1}$, correspondentes aos sub-condutores por fase, devem ser somadas de tal forma a constituirem as tensões de fase. Similarmente, as correntes equivalentes das fases são determinadas através do somatório das linhas de $\dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1}$ correspondentes aos respectivos sub-condutores por fase. Assim, feita a redução, é possível escrever:

$$\dot{\underline{I}}_c(x) = - \dot{\underline{\underline{y}}}_{cc} \frac{d\,\dot{\underline{V}}_c(x)}{dx} \qquad (2.23)$$

de onde resulta, finalmente:

$$\frac{d\,\dot{\underline{V}}_c(x)}{dx} = - \dot{\underline{\underline{Z}}}_R \cdot \dot{\underline{I}}_c(x) \qquad (2.24)$$

que é a equação diferencial reduzida para as tensões, que expandida, no caso de uma linha trifásica, resulta em:

$$\frac{d}{dx}\begin{bmatrix}\dot{V}_1\\ \dot{V}_2\\ \dot{V}_3\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\dot{z}_{11} & \dot{z}_{12} & \dot{z}_{13}\\ \dot{z}_{21} & \dot{z}_{22} & \dot{z}_{23}\\ \dot{z}_{31} & \dot{z}_{32} & \dot{z}_{33}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_3\end{bmatrix}$$

onde,

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_R$ - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida da linha de transmissão, já incorporados os efeitos dos cabos de guarda e dos sub-condutores de fase, em ohm/km;

$\dot{\underline{I}}_C(x)$ - Vetor das correntes equivalentes de fase;

$\frac{d\,\dot{\underline{V}}_C(x)}{dx}$ - Vetor das primeiras derivadas das tensões de fase.

b) A redução da matriz $\dot{\underline{\underline{Y}}}$

A redução da matriz de admitâncias transversais da linha de transmissão, $\dot{\underline{\underline{Y}}}$, desenvolve-se diretamente a partir da equação 2.20, estabelecendo-se as mesmas condições de contorno anteriores e as mesmas operações aritméticas necessárias a redução de $\dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1}$. Então, da mesma forma, a equação 2.20 transforma-se em:

$$\frac{d\,\dot{\underline{I}}_C(x)}{dx} = -\dot{\underline{\underline{Y}}}_R \cdot \dot{\underline{V}}_C(x) \qquad (2.25)$$

que expandida, resulta em:

$$\frac{d}{dx}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_3\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\dot{y}_{11} & \dot{y}_{12} & \dot{y}_{13}\\ \dot{y}_{21} & \dot{y}_{22} & \dot{y}_{23}\\ \dot{y}_{31} & \dot{y}_{32} & \dot{y}_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_1\\ \dot{V}_2\\ \dot{V}_3\end{bmatrix}$$

onde,

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_R$ - Matriz de admitâncias transversais reduzida da linha de transmissão, já incorporados os efeitos dos cabos de guarda e dos sub-condutores de fase, em siemens/km;

$\dot{\underline{V}}_c(x)$ - Vetor das tensões de fase;

$\frac{d\,\dot{\underline{I}}_c(x)}{dx}$ - Vetor das primeiras derivadas das correntes equivalentes de fase.

2.1.4- As Componentes Simétricas dos Parâmetros de Linhas Aéreas de Transmissão

Muitos dos estudos desenvolvidos no âmbito da análise dos sistemas elétricos de potência são mais facilmente formulados e solucionados através da utilização do método das componentes simétricas. A aplicação deste método exige o conhecimento das chamadas impedâncias sequenciais dos componentes do sistema.

No que diz respeito ao componente *linha de transmissão*, as matrizes de impedâncias e admitâncias sequenciais, $\dot{\underline{\underline{Z}}}_{012}$ e

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{012}$, respectivamente, podem ser obtidas através das bem conhecidas equações:

$$\dot{\underline{\underline{Z}}}_{012} = \dot{\underline{\underline{T}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_{R} \cdot \dot{\underline{\underline{T}}} \qquad (2.26)$$

$$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{012} = \dot{\underline{\underline{T}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{\underline{Y}}}_{R} \cdot \dot{\underline{\underline{T}}} \qquad (2.27)$$

onde,

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_{012}$ - Matriz das impedâncias sequenciais, em ohm/km;

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{012}$ - Matriz das admitâncias sequenciais, em siemens/km;

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_{R}$ - Matriz de impedâncias em coordenadas de fase;

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{R}$ - Matriz de admitâncias em coordenadas de fase;

a - Operador $1 \cdot e^{j120^{o}}$;

$\dot{\underline{\underline{T}}}$ e $\dot{\underline{\underline{T}}}^{-1}$ - Matriz transformação de componentes simétricas e sua inversa, onde:

$$\dot{\underline{\underline{T}}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & a^{2} & a \\ \hline 1 & a & a^{2} \\ \hline \end{array} \quad \text{e} \quad \dot{\underline{\underline{T}}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & a & a^{2} \\ \hline 1 & a^{2} & a \\ \hline \end{array}$$

Por outro lado, ao considerar-se linhas com transposições, isto é, linhas balanceadas eletromagneticamente, as equa

ções 2.24 e 2.25 transformam-se em:

$$\frac{d}{dx}\begin{bmatrix}\dot{V}_1\\ \dot{V}_2\\ \dot{V}_3\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\dot{Z}_s & \dot{Z}_m & \dot{Z}_m\\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_s & \dot{Z}_m\\ \dot{Z}_m & \dot{Z}_m & \dot{Z}_s\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_3\end{bmatrix} \qquad (2.28)$$

$$\frac{d}{dx}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \dot{I}_2\\ \dot{I}_3\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\dot{y}_s & \dot{y}_m & \dot{y}_m\\ \dot{y}_m & \dot{y}_s & \dot{y}_s\\ \dot{y}_m & \dot{y}_m & \dot{y}_s\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot{V}_1\\ \dot{V}_2\\ \dot{V}_3\end{bmatrix} \qquad (2.29)$$

onde, os elementos $\dot{z}_s$, $\dot{z}_m$, $\dot{y}_s$ e $\dot{y}_m$, são calculados pelo conjunto de equações:

$$\dot{z}_s = \frac{1}{3}(\dot{z}_{11} + \dot{z}_{22} + \dot{z}_{33}) \qquad (2.30)$$

$$\dot{z}_m = \frac{1}{3}(\dot{z}_{12} + \dot{z}_{13} + \dot{z}_{23}) \qquad (2.31)$$

$$\dot{y}_s = \frac{1}{3}(\dot{y}_{11} + \dot{y}_{22} + \dot{y}_{33}) \qquad (2.32)$$

$$\dot{y}_m = \frac{1}{3}(\dot{y}_{12} + \dot{y}_{13} + \dot{y}_{23}) \qquad (2.33)$$

Nestas condições, aplicando-se a transformação para componentes simétricas, equações 2.26 e 2.27, as matrizes $\dot{\underline{\underline{Z}}}_{012}$ e $\dot{\underline{\underline{Y}}}_{012}$, respectivamente, resultam diagonais. Portanto, os acoplamentos entre os circuitos de sequência zero, positiva e

negativa, traduzidos pelos elementos de fora da diagonal destas matrizes, deixam de existir.

2.2 - Caracterização da Linha de Transmissão a ser Estudada

Todos os resultados a serem discutidos no presente trabalho foram obtidos utilizando-se de uma linha de transmissão em corrente alternada e extra-alta-tensão, cuja configuração é descrita na figura 2.3,

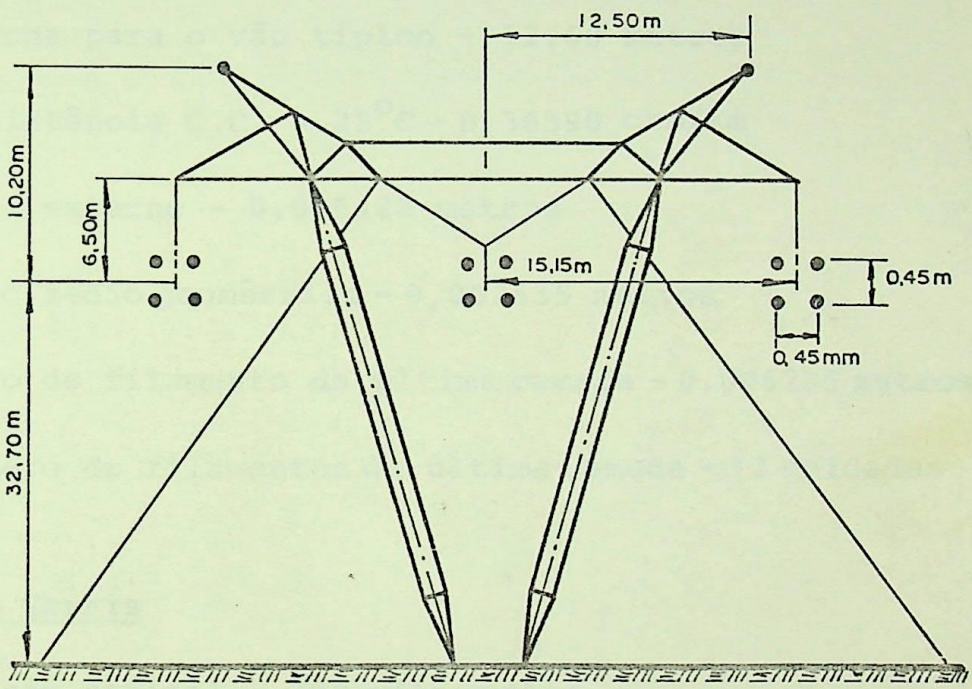


FIGURA 2.3 - Características Geométricas da Estrutura Básica[5].

e possui as seguintes características adicionais:

- Dados relativos aos condutores de fase

  . Tipo de condutor: CAA - BITTERN - 1272 kCM - 45/7

  . Flecha para o vão típico - 18,70 metros

  . Resistência C.C. a 25°C - 0,04580 ohm/km

. Raio externo - 0,017082 metros

. Raio médio geométrico - 0,013500 metros

. Raio do filamento da última camada - 0,001949 metros

. Número de filamentos da última camada - 20 unidades

- Dados relativos aos cabos de guarda

. Tipo de condutor: C A A - DOTTEREL - 176,9 kCM - 12/7

. Flecha para o vão típico - 12,60 metros

. Resistência C.C. a 25°C - 0,36590 ohm/km

. Raio externo - 0,015420 metros

. Raio médio geométrico - 0,002655 metros

. Raio do filamento da última camada - 0,006285 metros

. Número de filamentos da última camada - 12 unidades

- Dados Gerais

. Tensão nominal - 750 quilo-volts

. Frequência de operação - 60 hertz

. Resistividade do solo - 500 ohm.metro

. Temperatura de operação da linha - 75°C

2.3 - Os Parâmetros Calculados

Aplicando-se a metodologia descrita neste capítulo e um programa de cálculo desenvolvido durante o trabalho, cujo Manual do Usuário se encontra descrito no Anexo III, foi possível calcular, para a linha de transmissão em questão, todos os parâmetros relevantes que se apresentam listados a seguir, onde as impedâncias vêm expressas em ohm/km e as admitâncias em siemens/km.

Em função da simetria verificada nas matrizes de impedâncias e admitâncias, estas, antes de reduzidas, são listadas através dos elementos que constituem a diagonal e o triângulo superior destas matrizes.

**** DADOS DE ENTRADA ****

NUMERO DE CONJUNTOS DE CONDUTORES	3.
NUMERO DE PARA-RAIOS	2
FREQUENCIA [HZ]	60.
RESISTIVIDADE DO SOLO [OHM.M]	500.000
TEMPERATURA DE OPERACAO DA LINHA [C]	75.000

** DADOS RELATIVOS A GEOMETRIA DA LINHA **

DHCC - DISTANCIA HORIZONTAL AO EIXO DE REFERENCIA [M]
HCC - ALTURA NA ESTRUTURA [M]
NSCF - NUMERO DE CONDUTORES POR FASE
DSC - DISTANCIA ENTRE CONDUTORES DE UMA MESMA FASE [M]
FVTC - FLEXA PARA O VAO TIPICO [M]
CJ - NUMERO DE ORDEM DO CONJUNTO DE CONDUTORES OU PARA-RAIOS

* CONDUTORES *

-CJ-	DHCC	HCC	NSCF	DSC	FVTC
1	-15.15	32.70	4	.45	18.70
2	.00	32.70	4	.45	18.70
3	15.15	32.70	4	.45	18.70

* PARA-RAIOS *

-CJ-	DHCC	HCC	FVTC
4	-12.50	42.90	12.60
5	12.50	42.90	12.60

** DADOS DOS CABOS CONDUTORES E PARA-RAIOS **

TMC - MATERIAL DO CABO
1 - COBRE RECOZIDO
2 - COBRE TEMPERA DURA
3 - ALUMINIO TEMPERA DURA
4 - ACO GALVANIZADO
RETC - RESISTENCIA A 25 C [OHM/KM]
REXT - RAIO EXTERNO [M]
RMG - RAIO MEDIO GEOMETRICO [M]
RFC - RAIO DO FILAMENTO DA ULTIMA CAMADA [M]
NF - NUMERO DE FILAMENTOS DA ULTIMA CAMADA

* CONDUTORES *

-CJ-	-TMC-	---RETC---	---REXT---	---RMG---	---RFC---	-NF-
1	3	,04580	,017082	,013500	,001949	20
2	3	,04580	,017082	,013500	,001949	20
3	3	,04580	,017082	,013500	,001949	20

* PARA-RAIOS *

-CJ-	-TMC-	---RETC---	---REXT---	---RMG---	---RFC---	-NF-
4	4	,36590	,015420	,002655	,006285	12
5	4	,36590	,015420	,002655	,006285	12

MATRIZ DE IMPEDANCIAS PROPRIAS DOS CONDUTORES

Zc - [Ohm/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Zc(1, 1)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(2, 2)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(3, 3)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(4, 4)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(5, 5)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(6, 6)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(7, 7)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(8, 8)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(9, 9)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(10,10)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(11,11)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(12,12)	.548514E-01	.177439E-01
Zc(13,13)	.365900E+00	.132642E+00
Zc(14,14)	.365900E+00	.132642E+00

MATRIZ DE IMPEDANCIAS DEVIDAS A DISPOSICAO GEOMETRICA DOS CONDUTORES

Zg - [Ohm/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Zg(1, 1)	.000000E+00	.584361E+00
Zg(1, 2)	.000000E+00	.336856E+00
Zg(1, 3)	.000000E+00	.310730E+00
Zg(1, 4)	.000000E+00	.337721E+00
Zg(1, 5)	.000000E+00	.777105E-01
Zg(1, 6)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(1, 7)	.000000E+00	.750165E-01
Zg(1, 8)	.000000E+00	.757917E-01
Zg(1, 9)	.000000E+00	.376412E-01
Zg(1,10)	.000000E+00	.370919E-01
Zg(1,11)	.000000E+00	.364000E-01
Zg(1,12)	.000000E+00	.369431E-01
Zg(1,13)	.000000E+00	.989571E-01
Zg(1,14)	.000000E+00	.499221E-01
Zg(2, 2)	.000000E+00	.582631E+00
Zg(2, 3)	.000000E+00	.335991E+00
Zg(2, 4)	.000000E+00	.310730E+00
Zg(2, 5)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(2, 6)	.000000E+00	.762049E-01
Zg(2, 7)	.000000E+00	.742978E-01
Zg(2, 8)	.000000E+00	.750165E-01
Zg(2, 9)	.000000E+00	.370919E-01
Zg(2,10)	.000000E+00	.365578E-01
Zg(2,11)	.000000E+00	.358716E-01
Zg(2,12)	.000000E+00	.364000E-01
Zg(2,13)	.000000E+00	.960710E-01
Zg(2,14)	.000000E+00	.489266E-01
Zg(3, 3)	.000000E+00	.582631E+00
Zg(3, 4)	.000000E+00	.336856E+00
Zg(3, 5)	.000000E+00	.789115E-01
Zg(3, 6)	.000000E+00	.781850E-01
Zg(3, 7)	.000000E+00	.762049E-01
Zg(3, 8)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(3, 9)	.000000E+00	.378021E-01
Zg(3,10)	.000000E+00	.372621E-01
Zg(3,11)	.000000E+00	.365578E-01
Zg(3,12)	.000000E+00	.370919E-01
Zg(3,13)	.000000E+00	.964428E-01
Zg(3,14)	.000000E+00	.496245E-01
Zg(4, 4)	.000000E+00	.584361E+00
Zg(4, 5)	.000000E+00	.797021E-01
Zg(4, 6)	.000000E+00	.789115E-01
Zg(4, 7)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(4, 8)	.000000E+00	.777105E-01
Zg(4, 9)	.000000E+00	.383577E-01
Zg(4,10)	.000000E+00	.378021E-01

Zg(4,11)	.000000E+00	.370919E-01
Zg(4,12)	.000000E+00	.376412E-01
Zg(4,13)	.000000E+00	.993544E-01
Zg(4,14)	.000000E+00	.506363E-01
Zg(5, 5)	.000000E+00	.584361E+00
Zg(5, 6)	.000000E+00	.336856E+00
Zg(5, 7)	.000000E+00	.310730E+00
Zg(5, 8)	.000000E+00	.337721E+00
Zg(5, 9)	.000000E+00	.777105E-01
Zg(5,10)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(5,11)	.000000E+00	.750165E-01
Zg(5,12)	.000000E+00	.757917E-01
Zg(5,13)	.000000E+00	.813245E-01
Zg(5,14)	.000000E+00	.802822E-01
Zg(6, 6)	.000000E+00	.582631E+00
Zg(6, 7)	.000000E+00	.335991E+00
Zg(6, 8)	.000000E+00	.310730E+00
Zg(6, 9)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(6,10)	.000000E+00	.762049E-01
Zg(6,11)	.000000E+00	.742978E-01
Zg(6,12)	.000000E+00	.750165E-01
Zg(6,13)	.000000E+00	.793604E-01
Zg(6,14)	.000000E+00	.783617E-01
Zg(7, 7)	.000000E+00	.582631E+00
Zg(7, 8)	.000000E+00	.336856E+00
Zg(7, 9)	.000000E+00	.789115E-01
Zg(7,10)	.000000E+00	.781850E-01
Zg(7,11)	.000000E+00	.762049E-01
Zg(7,12)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(7,13)	.000000E+00	.783617E-01
Zg(7,14)	.000000E+00	.793604E-01
Zg(8, 8)	.000000E+00	.584361E+00
Zg(8, 9)	.000000E+00	.797021E-01
Zg(8,10)	.000000E+00	.789115E-01
Zg(8,11)	.000000E+00	.769276E-01
Zg(8,12)	.000000E+00	.777105E-01
Zg(8,13)	.000000E+00	.802822E-01
Zg(8,14)	.000000E+00	.813245E-01
Zg(9, 9)	.000000E+00	.584361E+00
Zg(9,10)	.000000E+00	.336856E+00
Zg(9,11)	.000000E+00	.310730E+00
Zg(9,12)	.000000E+00	.337721E+00
Zg(9,13)	.000000E+00	.506363E-01
Zg(9,14)	.000000E+00	.993544E-01
Zg(10,10)	.000000E+00	.582631E+00
Zg(10,11)	.000000E+00	.335991E+00
Zg(10,12)	.000000E+00	.310730E+00
Zg(10,13)	.000000E+00	.496245E-01
Zg(10,14)	.000000E+00	.964428E-01
Zg(11,11)	.000000E+00	.582631E+00
Zg(11,12)	.000000E+00	.336856E+00
Zg(11,13)	.000000E+00	.489266E-01
Zg(11,14)	.000000E+00	.960710E-01
Zg(12,12)	.000000E+00	.584361E+00
Zg(12,13)	.000000E+00	.499221E-01
Zg(12,14)	.000000E+00	.989571E-01
Zg(13,13)	.000000E+00	.632889E+00
Zg(13,14)	.000000E+00	.803814E-01
Zg(14,14)	.000000E+00	.632889E+00

MATRIZ DE IMPEDANCIAS DEVIDAS AO RETORNO IMPERFEITO

Zt - [Ohm/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Zt(1, 1)	.579102E-01	.293157E+00
Zt(1, 2)	.579245E-01	.294001E+00
Zt(1, 3)	.579245E-01	.293996E+00
Zt(1, 4)	.579102E-01	.293152E+00
Zt(1, 5)	.579038E-01	.288026E+00
Zt(1, 6)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(1, 7)	.579176E-01	.288466E+00
Zt(1, 8)	.579034E-01	.287737E+00
Zt(1, 9)	.578848E-01	.275837E+00
Zt(1,10)	.578989E-01	.276363E+00
Zt(1,11)	.578982E-01	.275944E+00
Zt(1,12)	.578840E-01	.275424E+00
Zt(1,13)	.574644E-01	.270400E+00
Zt(1,14)	.574450E-01	.261581E+00
Zt(2, 2)	.579387E-01	.294856E+00
Zt(2, 3)	.579387E-01	.294851E+00
Zt(2, 4)	.579245E-01	.293996E+00
Zt(2, 5)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(2, 6)	.579323E-01	.289500E+00
Zt(2, 7)	.579319E-01	.289201E+00
Zt(2, 8)	.579176E-01	.288466E+00
Zt(2, 9)	.578989E-01	.276363E+00
Zt(2,10)	.579131E-01	.276890E+00
Zt(2,11)	.579123E-01	.276465E+00
Zt(2,12)	.578982E-01	.275944E+00
Zt(2,13)	.574783E-01	.271015E+00
Zt(2,14)	.574588E-01	.262064E+00
Zt(3, 3)	.579387E-01	.294856E+00
Zt(3, 4)	.579245E-01	.294001E+00
Zt(3, 5)	.579184E-01	.289047E+00
Zt(3, 6)	.579326E-01	.289794E+00
Zt(3, 7)	.579323E-01	.289500E+00
Zt(3, 8)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(3, 9)	.578997E-01	.276780E+00
Zt(3,10)	.579139E-01	.277314E+00
Zt(3,11)	.579131E-01	.276890E+00
Zt(3,12)	.578989E-01	.276363E+00
Zt(3,13)	.574784E-01	.271046E+00
Zt(3,14)	.574595E-01	.262323E+00
Zt(4, 4)	.579102E-01	.293157E+00
Zt(4, 5)	.579042E-01	.288307E+00
Zt(4, 6)	.579184E-01	.289047E+00
Zt(4, 7)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(4, 8)	.579038E-01	.288026E+00
Zt(4, 9)	.578855E-01	.276249E+00
Zt(4,10)	.578997E-01	.276780E+00

Zt(4,11)	.578989E-01	.276363E+00
Zt(4,12)	.578848E-01	.275837E+00
Zt(4,13)	.574645E-01	.270431E+00
Zt(4,14)	.574456E-01	.261837E+00
Zt(5, 5)	.579102E-01	.293157E+00
Zt(5, 6)	.579245E-01	.294001E+00
Zt(5, 7)	.579245E-01	.293996E+00
Zt(5, 8)	.579102E-01	.293152E+00
Zt(5, 9)	.579038E-01	.288026E+00
Zt(5,10)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(5,11)	.579176E-01	.288466E+00
Zt(5,12)	.579034E-01	.287737E+00
Zt(5,13)	.574608E-01	.268603E+00
Zt(5,14)	.574605E-01	.268464E+00
Zt(6, 6)	.579387E-01	.294856E+00
Zt(6, 7)	.579387E-01	.294851E+00
Zt(6, 8)	.579245E-01	.293996E+00
Zt(6, 9)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(6,10)	.579323E-01	.289500E+00
Zt(6,11)	.579319E-01	.289201E+00
Zt(6,12)	.579176E-01	.288466E+00
Zt(6,13)	.574747E-01	.269188E+00
Zt(6,14)	.574744E-01	.269047E+00
Zt(7, 7)	.579387E-01	.294856E+00
Zt(7, 8)	.579245E-01	.294001E+00
Zt(7, 9)	.579184E-01	.289047E+00
Zt(7,10)	.579326E-01	.289794E+00
Zt(7,11)	.579323E-01	.289500E+00
Zt(7,12)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(7,13)	.574744E-01	.269047E+00
Zt(7,14)	.574747E-01	.269188E+00
Zt(8, 8)	.579102E-01	.293157E+00
Zt(8, 9)	.579042E-01	.288307E+00
Zt(8,10)	.579184E-01	.289047E+00
Zt(8,11)	.579180E-01	.288760E+00
Zt(8,12)	.579038E-01	.288026E+00
Zt(8,13)	.574605E-01	.268464E+00
Zt(8,14)	.574608E-01	.268603E+00
Zt(9, 9)	.579102E-01	.293157E+00
Zt(9,10)	.579245E-01	.294001E+00
Zt(9,11)	.579245E-01	.293996E+00
Zt(9,12)	.579102E-01	.293152E+00
Zt(9,13)	.574456E-01	.261837E+00
Zt(9,14)	.574645E-01	.270431E+00
Zt(10,10)	.579387E-01	.294856E+00
Zt(10,11)	.579387E-01	.294851E+00
Zt(10,12)	.579245E-01	.293996E+00
Zt(10,13)	.574595E-01	.262323E+00
Zt(10,14)	.574784E-01	.271046E+00
Zt(11,11)	.579387E-01	.294856E+00
Zt(11,12)	.579245E-01	.294001E+00
Zt(11,13)	.574588E-01	.262064E+00
Zt(11,14)	.574783E-01	.271015E+00
Zt(12,12)	.579102E-01	.293157E+00
Zt(12,13)	.574450E-01	.261581E+00
Zt(12,14)	.574644E-01	.270400E+00
Zt(13,13)	.570294E-01	.253311E+00
Zt(13,14)	.570148E-01	.248557E+00
Zt(14,14)	.570294E-01	.253311E+00

MATRIZ DE IMPEDANCIAS LONGITUDINAIS (COMPLETA)

Z - [Ohm/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Z(1, 1)	.112762E+00	.895261E+00
Z(1, 2)	.579245E-01	.630857E+00
Z(1, 3)	.579245E-01	.604726E+00
Z(1, 4)	.579102E-01	.630873E+00
Z(1, 5)	.579038E-01	.365736E+00
Z(1, 6)	.579180E-01	.365687E+00
Z(1, 7)	.579176E-01	.363482E+00
Z(1, 8)	.579034E-01	.363529E+00
Z(1, 9)	.578848E-01	.313478E+00
Z(1,10)	.578989E-01	.313455E+00
Z(1,11)	.578982E-01	.312344E+00
Z(1,12)	.578840E-01	.312367E+00
Z(1,13)	.574644E-01	.369357E+00
Z(1,14)	.574450E-01	.311504E+00
Z(2, 2)	.112790E+00	.895230E+00
Z(2, 3)	.579387E-01	.630842E+00
Z(2, 4)	.579245E-01	.604726E+00
Z(2, 5)	.579180E-01	.365687E+00
Z(2, 6)	.579323E-01	.365705E+00
Z(2, 7)	.579319E-01	.363498E+00
Z(2, 8)	.579176E-01	.363482E+00
Z(2, 9)	.578989E-01	.313455E+00
Z(2,10)	.579131E-01	.313448E+00
Z(2,11)	.579123E-01	.312337E+00
Z(2,12)	.578982E-01	.312344E+00
Z(2,13)	.574783E-01	.367086E+00
Z(2,14)	.574588E-01	.310991E+00
Z(3, 3)	.112790E+00	.895230E+00
Z(3, 4)	.579245E-01	.630857E+00
Z(3, 5)	.579184E-01	.367959E+00
Z(3, 6)	.579326E-01	.367979E+00
Z(3, 7)	.579323E-01	.365705E+00
Z(3, 8)	.579180E-01	.365687E+00
Z(3, 9)	.578997E-01	.314583E+00
Z(3,10)	.579139E-01	.314576E+00
Z(3,11)	.579131E-01	.313448E+00
Z(3,12)	.578989E-01	.313455E+00
Z(3,13)	.574784E-01	.367489E+00
Z(3,14)	.574595E-01	.311947E+00
Z(4, 4)	.112762E+00	.895261E+00
Z(4, 5)	.579042E-01	.368009E+00
Z(4, 6)	.579184E-01	.367959E+00
Z(4, 7)	.579180E-01	.365687E+00
Z(4, 8)	.579038E-01	.365736E+00
Z(4, 9)	.578855E-01	.314607E+00
Z(4,10)	.578997E-01	.314583E+00

Z(4,11)	.578989E-01	.313455E+00
Z(4,12)	.578848E-01	.313478E+00
Z(4,13)	.574645E-01	.369785E+00
Z(4,14)	.574456E-01	.312473E+00
Z(5, 5)	.112762E+00	.895261E+00
Z(5, 6)	.579245E-01	.630857E+00
Z(5, 7)	.579245E-01	.604726E+00
Z(5, 8)	.579102E-01	.630873E+00
Z(5, 9)	.579038E-01	.365736E+00
Z(5,10)	.579180E-01	.365687E+00
Z(5,11)	.579176E-01	.363482E+00
Z(5,12)	.579034E-01	.363529E+00
Z(5,13)	.574608E-01	.349927E+00
Z(5,14)	.574605E-01	.348747E+00
Z(6, 6)	.112790E+00	.895230E+00
Z(6, 7)	.579387E-01	.630842E+00
Z(6, 8)	.579245E-01	.604726E+00
Z(6, 9)	.579180E-01	.365687E+00
Z(6,10)	.579323E-01	.365705E+00
Z(6,11)	.579319E-01	.363498E+00
Z(6,12)	.579176E-01	.363482E+00
Z(6,13)	.574747E-01	.348549E+00
Z(6,14)	.574744E-01	.347409E+00
Z(7, 7)	.112790E+00	.895230E+00
Z(7, 8)	.579245E-01	.630857E+00
Z(7, 9)	.579184E-01	.367959E+00
Z(7,10)	.579326E-01	.367979E+00
Z(7,11)	.579323E-01	.365705E+00
Z(7,12)	.579180E-01	.365687E+00
Z(7,13)	.574744E-01	.347409E+00
Z(7,14)	.574747E-01	.348549E+00
Z(8, 8)	.112762E+00	.895261E+00
Z(8, 9)	.579042E-01	.368009E+00
Z(8,10)	.579184E-01	.367959E+00
Z(8,11)	.579180E-01	.365687E+00
Z(8,12)	.579038E-01	.365736E+00
Z(8,13)	.574605E-01	.348747E+00
Z(8,14)	.574608E-01	.349927E+00
Z(9, 9)	.112762E+00	.895261E+00
Z(9,10)	.579245E-01	.630857E+00
Z(9,11)	.579245E-01	.604726E+00
Z(9,12)	.579102E-01	.630873E+00
Z(9,13)	.574456E-01	.312473E+00
Z(9,14)	.574645E-01	.369785E+00
Z(10,10)	.112790E+00	.895230E+00
Z(10,11)	.579387E-01	.630842E+00
Z(10,12)	.579245E-01	.604726E+00
Z(10,13)	.574595E-01	.311947E+00
Z(10,14)	.574784E-01	.367489E+00
Z(11,11)	.112790E+00	.895230E+00
Z(11,12)	.579245E-01	.630857E+00
Z(11,13)	.574588E-01	.310991E+00
Z(11,14)	.574783E-01	.367086E+00
Z(12,12)	.112762E+00	.895261E+00
Z(12,13)	.574450E-01	.311504E+00
Z(12,14)	.574644E-01	.369357E+00
Z(13,13)	.422929E+00	.101884E+01
Z(13,14)	.570148E-01	.328938E+00
Z(14,14)	.422929E+00	.101884E+01

MATRIZ DE IMPEDANCIAS LONGITUDINAIS (REDUZIDA)

Z - [Ohm/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Z(1, 1)	.738239E-01	.522293E+00
Z(1, 2)	.598549E-01	.195353E+00
Z(1, 3)	.581537E-01	.149009E+00
Z(2, 1)	.598549E-01	.195353E+00
Z(2, 2)	.743781E-01	.515862E+00
Z(2, 3)	.598549E-01	.195353E+00
Z(3, 1)	.581537E-01	.149009E+00
Z(3, 2)	.598549E-01	.195353E+00
Z(3, 3)	.738239E-01	.522293E+00

MATRIZ DE IMPEDANCIAS SEQUENCIAIS

Z012 - [Ohm/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Z(1, 1)	.192568E+00	.879959E+00
Z(1, 2)	.111541E-01	-.728865E-02
Z(1, 3)	-.118892E-01	-.601542E-02
Z(2, 1)	-.118892E-01	-.601535E-02
Z(2, 2)	.147042E-01	.340245E+00
Z(2, 3)	-.281305E-01	.173566E-01
Z(3, 1)	.111541E-01	-.728863E-02
Z(3, 2)	.290966E-01	.156833E-01
Z(3, 3)	.147042E-01	.340245E+00

MATRIZ DE ADMITANCIAS TRANSVERSAIS (COMPLETA)

Y - [Siemens/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Y(1, 1)	,000000E+00	,496262E-05
Y(1, 2)	,000000E+00	-,152396E-05
Y(1, 3)	,000000E+00	-,835194E-06
Y(1, 4)	,000000E+00	-,152358E-05
Y(1, 5)	,000000E+00	-,432771E-07
Y(1, 6)	,000000E+00	-,416854E-07
Y(1, 7)	,000000E+00	-,348257E-07
Y(1, 8)	,000000E+00	-,363614E-07
Y(1, 9)	,000000E+00	-,111572E-07
Y(1,10)	,000000E+00	-,104622E-07
Y(1,11)	,000000E+00	-,938303E-08
Y(1,12)	,000000E+00	-,100636E-07
Y(1,13)	,000000E+00	-,149986E-06
Y(1,14)	,000000E+00	-,411682E-07
Y(2, 2)	,000000E+00	,496529E-05
Y(2, 3)	,000000E+00	-,152102E-05
Y(2, 4)	,000000E+00	-,835248E-06
Y(2, 5)	,000000E+00	-,418304E-07
Y(2, 6)	,000000E+00	-,412742E-07
Y(2, 7)	,000000E+00	-,344010E-07
Y(2, 8)	,000000E+00	-,349912E-07
Y(2, 9)	,000000E+00	-,104542E-07
Y(2,10)	,000000E+00	-,991026E-08
Y(2,11)	,000000E+00	-,884506E-08
Y(2,12)	,000000E+00	-,938306E-08
Y(2,13)	,000000E+00	-,125623E-06
Y(2,14)	,000000E+00	-,364092E-07
Y(3, 3)	,000000E+00	,496841E-05
Y(3, 4)	,000000E+00	-,152073E-05
Y(3, 5)	,000000E+00	-,497797E-07
Y(3, 6)	,000000E+00	-,492575E-07
Y(3, 7)	,000000E+00	-,407414E-07
Y(3, 8)	,000000E+00	-,413038E-07
Y(3, 9)	,000000E+00	-,117292E-07
Y(3,10)	,000000E+00	-,111704E-07
Y(3,11)	,000000E+00	-,991021E-08
Y(3,12)	,000000E+00	-,104622E-07
Y(3,13)	,000000E+00	-,125692E-06
Y(3,14)	,000000E+00	-,389574E-07
Y(4, 4)	,000000E+00	,496595E-05
Y(4, 5)	,000000E+00	-,512841E-07
Y(4, 6)	,000000E+00	-,496248E-07
Y(4, 7)	,000000E+00	-,411285E-07
Y(4, 8)	,000000E+00	-,427280E-07
Y(4, 9)	,000000E+00	-,124464E-07
Y(4,10)	,000000E+00	-,117291E-07

Y(4,11)	.000000E+00	-.104542E-07
Y(4,12)	.000000E+00	-.111572E-07
Y(4,13)	.000000E+00	-.150333E-06
Y(4,14)	.000000E+00	-.438631E-07
Y(5, 5)	.000000E+00	.497084E-05
Y(5, 6)	.000000E+00	-.151572E-05
Y(5, 7)	.000000E+00	-.828735E-06
Y(5, 8)	.000000E+00	-.151717E-05
Y(5, 9)	.000000E+00	-.427278E-07
Y(5,10)	.000000E+00	-.413039E-07
Y(5,11)	.000000E+00	-.349914E-07
Y(5,12)	.000000E+00	-.363614E-07
Y(5,13)	.000000E+00	-.100876E-06
Y(5,14)	.000000E+00	-.925481E-07
Y(6, 6)	.000000E+00	.497349E-05
Y(6, 7)	.000000E+00	-.151453E-05
Y(6, 8)	.000000E+00	-.828736E-06
Y(6, 9)	.000000E+00	-.411284E-07
Y(6,10)	.000000E+00	-.407415E-07
Y(6,11)	.000000E+00	-.344009E-07
Y(6,12)	.000000E+00	-.348259E-07
Y(6,13)	.000000E+00	-.862862E-07
Y(6,14)	.000000E+00	-.785199E-07
Y(7, 7)	.000000E+00	.497348E-05
Y(7, 8)	.000000E+00	-.151572E-05
Y(7, 9)	.000000E+00	-.496248E-07
Y(7,10)	.000000E+00	-.492577E-07
Y(7,11)	.000000E+00	-.412744E-07
Y(7,12)	.000000E+00	-.416852E-07
Y(7,13)	.000000E+00	-.785201E-07
Y(7,14)	.000000E+00	-.862862E-07
Y(8, 8)	.000000E+00	.497084E-05
Y(8, 9)	.000000E+00	-.512844E-07
Y(8,10)	.000000E+00	-.497795E-07
Y(8,11)	.000000E+00	-.418301E-07
Y(8,12)	.000000E+00	-.432770E-07
Y(8,13)	.000000E+00	-.925481E-07
Y(8,14)	.000000E+00	-.100876E-06
Y(9, 9)	.000000E+00	.496595E-05
Y(9,10)	.000000E+00	-.152073E-05
Y(9,11)	.000000E+00	-.835249E-06
Y(9,12)	.000000E+00	-.152359E-05
Y(9,13)	.000000E+00	-.438631E-07
Y(9,14)	.000000E+00	-.150334E-06
Y(10,10)	.000000E+00	.496841E-05
Y(10,11)	.000000E+00	-.152103E-05
Y(10,12)	.000000E+00	-.835195E-06
Y(10,13)	.000000E+00	-.389574E-07
Y(10,14)	.000000E+00	-.125691E-06
Y(11,11)	.000000E+00	.496529E-05
Y(11,12)	.000000E+00	-.152396E-05
Y(11,13)	.000000E+00	-.364092E-07
Y(11,14)	.000000E+00	-.125623E-06
Y(12,12)	.000000E+00	.496262E-05
Y(12,13)	.000000E+00	-.411682E-07
Y(12,14)	.000000E+00	-.149986E-06
Y(13,13)	.000000E+00	.267178E-05
Y(13,14)	.000000E+00	-.225905E-06
Y(14,14)	.000000E+00	.267177E-05

MATRIZ DE ADMITANCIAS TRANSVERSAIS (REDUZIDA)

Y - [Siemens/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Y(1, 1)	,000000E+00	,434279E-05
Y(1, 2)	,000000E+00	-,674494E-06
Y(1, 3)	,000000E+00	-,168718E-06
Y(2, 1)	,000000E+00	-,674494E-06
Y(2, 2)	,000000E+00	,444742E-05
Y(2, 3)	,000000E+00	-,674494E-06
Y(3, 1)	,000000E+00	-,168718E-06
Y(3, 2)	,000000E+00	-,674494E-06
Y(3, 3)	,000000E+00	,434279E-05

MATRIZ DE ADMITANCIAS SEQUENCIAIS

Y012 - [Siemens/Km]

ELEMENTO	REAL	IMAGINARIA
Y(1, 1)	.000000E+00	.336587E-05
Y(1, 2)	-.115801E-06	.668581E-07
Y(1, 3)	.115801E-06	.668581E-07
Y(2, 1)	.115801E-06	.668580E-07
Y(2, 2)	.568434E-13	.488357E-05
Y(2, 3)	.322214E-06	-.186031E-06
Y(3, 1)	-.115801E-06	.668580E-07
Y(3, 2)	-.322214E-06	-.186031E-06
Y(3, 3)	-.568434E-13	.488357E-05

CAPITULO 3

A SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PROPAGAÇÃO NUM SISTEMA DE MULTI-CONDUTORES

CAPÍTULO 3

A SOLUCÃO DAS EQUAÇÕES DE PROPAGAÇÃO NUM SISTEMA DE MULTI-CONDUTORES

3.1 - Introdução

A análise, em regime permanente, do desempenho de linhas de transmissão recorre, usualmente, à solução das equações de propagação, na pressuposição da existência de transposições igualmente dispostas ao longo da linha, fato que permite considerar a mesma como um sistema equilibrado de impedâncias. Nestas circunstâncias, a aplicação da teoria de componentes simétricas permite obter, de maneira simples, a referida solução para condições desequilibradas ou equilibradas de tensões ou correntes bastando, neste último caso, analisar um circuito monofásico equivalente. No entanto e porque alguns problemas importantes exigem uma representação mais realista da linha, o presente capítulo faz a derivação da solução analítica das equações de propagação, considerando a linha como um sistema de N condutores na presença de uma terra imperfeita, e utiliza a transformação modal para colocar tal solução em forma apropriada para o cálculo numérico. O capítulo termina descrevendo uma aplicação da teoria ao cálculo das transposições no desequilíbrio de tensões e correntes ao longo de uma linha de transmissão, sob várias condições de carregamento.

3.2 - A Forma Exponencial da Solução das Equações de Propagação

As equações 2.15 e 2.20, representativas da propagação dos sinais da tensão e corrente, respectivamente, num sistema de multi-condutores, quando colocadas sob forma compacta, podem ser escritas como:

$$\frac{d\underline{V}(x)}{dx} = - \underline{\underline{Z}} \cdot \underline{I}(x) \qquad (3.1)$$

$$\frac{d\underline{I}(x)}{dx} = - \underline{\underline{Y}} \cdot \underline{V}(x) \qquad (3.2)$$

Calculando as segundas derivadas e separando variáveis, resulta em

$$\frac{d^2\underline{V}(x)}{dx^2} = \underline{\underline{Z}} \cdot \underline{\underline{Y}} \cdot \underline{V}(x) \qquad (3.3)$$

$$\frac{d^2\underline{I}(x)}{dx^2} = \underline{\underline{Y}} \cdot \underline{\underline{Z}} \cdot \underline{I}(x) \qquad (3.4)$$

Como as matrizes $\underline{\underline{Z}}$ e $\underline{\underline{Y}}$ são simétricas, isto é, $\underline{\underline{Z}}_t = \underline{\underline{Z}}$ e $\underline{\underline{Y}}_t = \underline{\underline{Y}}$, a equação 3.4 pode ser re-escrita como:

$$\frac{d^2 \underline{\underline{I}}(x)}{dx^2} = \underline{\underline{Y}}_t \cdot \underline{\underline{Z}}_t \cdot \underline{\underline{I}}(x)$$

ou

$$\frac{d^2 \underline{\underline{I}}(x)}{dx^2} = [\underline{\underline{Z}} \cdot \underline{\underline{Y}}]_t \cdot \underline{\underline{I}}(x) \qquad (3.5)$$

fazendo, por conveniência,

$$\underline{\underline{Z}} \cdot \underline{\underline{Y}} = \underline{\underline{\Psi}}^2 \qquad (3.6)$$

os sistemas de equações diferenciais 3.3 e 3.4 transformam-se em:

$$\frac{d^2 \underline{V}(x)}{dx^2} = \underline{\underline{\Psi}}^2 \cdot \underline{V}(x) \qquad (3.7)$$

$$\frac{d^2 \underline{\underline{I}}(x)}{dx^2} = \underline{\underline{\Psi}}^2_t \cdot \underline{\underline{I}}(x) \qquad (3.8)$$

Os sistemas de equações diferenciais contidas nas expressões 3.7 e 3.8 possuem soluções bem conhecidas que se podem escrever na forma:

$$\underline{V}(x) = e^{-\underline{\underline{\Psi}} \cdot x} \cdot \underline{V}_i + e^{\underline{\underline{\Psi}} \cdot x} \cdot \underline{V}_r \qquad (3.9)$$

$$\underline{\dot{I}}^{f}(x) = e^{-\underline{\dot{\Psi}}.x} \cdot \underline{\dot{I}}_i^{f} + e^{\underline{\dot{\Psi}}.x} \cdot \underline{\dot{I}}_r^{f} \qquad (3.10)$$

Nestas equações, $\underline{\dot{V}}_i^f$, $\underline{\dot{V}}_r^f$, $\underline{\dot{I}}_i^f$ e $\underline{\dot{I}}_r^f$ são constantes de integração determináveis a partir de condições iniciais conhecidas. No entanto, como estas constantes não são todas independentes, é possível exprimir, por exemplo, $\underline{\dot{I}}_i^f$ e $\underline{\dot{I}}_r^f$ em função de $\underline{\dot{V}}_i^f$ e $\underline{\dot{V}}_r^f$, respectivamente. Para tal, retome-se a equação 3.1. Explicitando o valor de $\underline{\dot{I}}^{f}(x)$, resulta:

$$\underline{\dot{I}}^{f}(x) = - \underline{\dot{\underline{Z}}}^{-1} \cdot \frac{d\underline{\dot{V}}^{f}(x)}{dx} \qquad (3.11)$$

Calculando agora $\frac{d\underline{\dot{V}}^{f}(x)}{dx}$ a partir da equação 3.9 e substituindo na equação anterior, obtém-se finalmente

$$\underline{\dot{I}}^{f}(x) = \underline{\dot{\underline{Y}}}_c \cdot (e^{-\underline{\dot{\Psi}}.x} \cdot \underline{\dot{V}}_i^{f} - e^{\underline{\dot{\Psi}}.x} \cdot \underline{\dot{V}}_r^{f}) \qquad (3.12)$$

onde, $\underline{\dot{\underline{Y}}}_c$, representa a matriz das admitâncias características do sistema, que pode ser expressa por:

$$\underline{\dot{\underline{Y}}}_c = \underline{\dot{\underline{Z}}} \cdot \underline{\dot{\Psi}} \qquad (3.13)$$

Desta forma, através das equações 3.9 e 3.12, é possível calcular os valores das tensões e correntes em todos os

condutores em qualquer ponto do sistema, uma vez determinadas as constantes de integração $\underline{\dot{V}}_i^f$ e $\underline{\dot{V}}_r^f$, que por sua vez, são calculadas a partir do conhecimento das condições de funcionamento em um ponto específico da linha, escolhido arbitrariamente.

3.2.1- Tensões e Correntes Fixadas na Emissão

Assim, por exemplo, se as tensões e correntes são conhecidas no extremo emissor do sistema, fazendo x=0, as equações 3.9 e 3.12 conduzem a

$$\underline{V}^{.f}(0) = \underline{V}_E^{.f} = \underline{V}_i^{.f} + \underline{V}_r^{.f} \tag{3.14}$$

$$\underline{I}^{.f}(0) = \underline{I}_E^{.f} = \underline{\underline{Y}}_c^{.} \cdot (\underline{V}_i^{.f} - \underline{V}_r^{.f}) \tag{3.15}$$

A solução do sistema de equações anteriores, em ordem às constantes desconhecidas $\underline{\dot{V}}_i^f$ e $\underline{\dot{V}}_r^f$, resulta em:

$$\underline{V}_i^{.f} = \frac{(\underline{V}_E^{.f} + \underline{\underline{Z}}_c^{.} \cdot \underline{I}_E^{.f})}{2} \tag{3.16}$$

$$\underline{V}_r^{.f} = \frac{(\underline{V}_E^{.f} - \underline{\underline{Z}}_c^{.} \cdot \underline{I}_E^{.f})}{2} \tag{3.17}$$

onde, $\underline{\underline{Z}}_c^{.} = \underline{\underline{Y}}_c^{.-1}$, representa a matriz de impedâncias características da linha.

Substituindo as constantes de integração $\dot{\underline{V}}_i^f$ e $\dot{\underline{V}}_r^f$, agora conhecidas, nas equações 3.9 e 3.12, transformam estas últimas em:

$$\dot{\underline{V}}^f(x) = \frac{1}{2} \cdot \left[e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot (\underline{V}_E^f + \underline{\underline{Z}}_C \cdot \underline{I}_E^f) + e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot (\underline{V}_E^f - \underline{\underline{Z}}_C \cdot \underline{I}_E^f) \right] \qquad (3.18)$$

$$\dot{\underline{I}}^f(x) = \frac{1}{2} \cdot \underline{\underline{Y}}_C \cdot \left[e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot (\underline{V}_E^f + \underline{\underline{Z}}_C \cdot \underline{I}_E^f) - e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot (\underline{V}_E^f - \underline{\underline{Z}}_C \cdot \underline{I}_E^f) \right] \qquad (3.19)$$

3.2.2- Tensões e Correntes Fixadas na Recepção

Em problemas usuais as correntes no terminal emissor da linha são valores que devem ser calculados em função da tensão e do carregamento imposto ao extremo receptor. Por este motivo torna-se conveniente dispor de equações que permitam incorporar diretamente tais condições. Assim sendo, as soluções dos sistemas de equações diferenciais, tomando o terminal receptor como a origem do sistema, exprimem-se por:

$$\dot{\underline{V}}^f(x) = e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot \underline{V}_i^f + e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot \underline{V}_r^f \qquad (3.20)$$

$$\dot{\underline{I}}^f(x) = e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot \underline{I}_i^f + e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot \underline{I}_r^f \qquad (3.21)$$

As equações anteriores, manipuladas de forma semelhante às

equações 3.9 e 3.10, conduzem a

$$\underline{V}^{.f}(x) = \frac{1}{2} \cdot \left[e^{-\underline{\underline{\Psi}}^{\cdot}.x} \cdot (\underline{V}_R^{.f} - \underline{\underline{Z}}_c \cdot \underline{I}_R^{.f}) + e^{\underline{\underline{\Psi}}^{\cdot}.x} \cdot (\underline{V}_R^{.f} + \underline{\underline{Z}}_c \cdot \underline{I}_R^{.f}) \right] \qquad (3.22)$$

$$\underline{I}^{.f}(x) = \frac{1}{2} \cdot \underline{\underline{Y}}_c^{\cdot} \cdot \left[-e^{-\underline{\underline{\Psi}}^{\cdot}.x} \cdot (\underline{V}_R^{.f} - \underline{\underline{Z}}_c \cdot \underline{I}_R^{.f}) + e^{\underline{\underline{\Psi}}^{\cdot}.x} \cdot (\underline{V}_R^{.f} + \underline{\underline{Z}}_c \cdot \underline{I}_R^{.f}) \right] \qquad (3.23)$$

As equações 3.18 e 3.19 ou 3.22 e 3.23 permitem determinar as condições de funcionamento em qualquer ponto do sistema de multi-condutores, a partir da definição das tensões e correntes no terminal adotado como a origem do sistema.

3.2.3- Tensões Fixadas na Emissão e Carga Conhecida na Recepção. A Solução Via Matriz dos Coeficientes de Reflexão - $\underline{\underline{k}}_V^{\cdot}$

A utilização das equações 3.18 e 3.19 requer o conhecimento das tensões e correntes no terminal emissor. No entanto, à priori, as correntes neste ponto são desconhecidas e devem refletir as condições de carga impostas ao terminal receptor. Então, o conceito de Matriz de Reflexão, apresentado a seguir, contorna esta dificuldade. Assim, por exemplo, se no terminal receptor houver uma carga modelada através de uma matriz de admitâncias constantes, isto é, $\underline{\underline{Y}}_{cg}^{\cdot}$, pode-se escrever:

$$\underline{I}_R^{.f} = \underline{\underline{Y}}_{cg}^{\cdot} \cdot \underline{V}_R^{.f} \qquad (3.24)$$

Ao se considerar o conjunto de equações 3.9 e 3.12, para

$x = \ell$, obtém-se:

$$\underline{V}_R^{.f} = e^{-\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_i^{.f} + e^{\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot V_r^{.f} \tag{3.25}$$

$$\underline{I}_R^{.f} = \dot{\underline{Y}}_c \cdot (e^{-\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_i^{.f} - e^{\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_r^{.f}) \tag{3.26}$$

que substituídas na equação 3.24, após agrupamento de termos semelhantes, resulta:

$$(\dot{\underline{Z}}_{cg} \cdot \dot{\underline{Y}}_c - \dot{\underline{U}}) \cdot e^{-\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_i^{.f} = (\dot{\underline{U}} + \dot{\underline{Z}}_{cg} \cdot \dot{\underline{Y}}_c) \cdot e^{\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_r^{.f} \tag{3.27}$$

Esta última equação, manipulada convenientemente, conduz a

$$\underline{V}_{r_R}^{.f} = (\dot{\underline{U}} + \dot{\underline{Z}}_{cg} \cdot \dot{\underline{Y}}_c)^{-1} \cdot (\dot{\underline{Z}}_{cg} \cdot \dot{\underline{Y}}_c - \dot{\underline{U}}) \cdot \underline{V}_{i_R}^{.f} \tag{3.28}$$

Na qual,

$$\underline{V}_{i_R}^{.f} = e^{-\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_i^{.f}$$

representa o valor da onda incidente de tensão na recepção

e

$$\underline{V}_{r_R}^{.f} = e^{\dot{\underline{\Psi}}.\ell} \cdot \underline{V}_r^{.f} \ ,$$

representa o valor da onda refletida de tensão, também na recepção. Como, por definição, a matriz dos coeficientes de reflexão de tensão é definida pela expressão:

$$\dot{V}^{f}_{r_R} = \dot{\underline{k}}_v \cdot \dot{V}^{f}_{i_R} \tag{3.29}$$

resulta, a partir da equação 3.28, que

$$\dot{\underline{k}}_v = (\dot{\underline{U}} + \dot{\underline{Z}}_{cg} \cdot \dot{\underline{Y}}_c)^{-1} \cdot (\dot{\underline{Z}}_{cg} \cdot \dot{\underline{Y}}_c - \dot{\underline{U}}) \tag{3.30}$$

onde $\dot{\underline{U}}$ e $\dot{\underline{Z}}_{cg}$ representam, respectivamente, a matriz unitária e a matriz de impedâncias constantes da carga.

Por uma questão de conveniência, a matriz de reflexão, $\dot{\underline{k}}_v$, pode ainda ser expressa, alternativamente, ou em função de matrizes de admitâncias ou em função de matrizes de impedâncias. Na verdade facilmente se verifica que,[6]

$$\dot{\underline{k}}_v = (\dot{\underline{Y}}_c + \dot{\underline{Y}}_{cg})^{-1} \cdot (\dot{\underline{Y}}_c - \dot{\underline{Y}}_{cg}) \tag{3.31}$$

ou

$$\dot{\underline{k}}_v = (\dot{\underline{Z}}_{cg} - \dot{\underline{Z}}_c) \cdot (\dot{\underline{Z}}_{cg} + \dot{\underline{Z}}_c)^{-1} \tag{3.32}$$

Um desenvolvimento analítico semelhante ao anterior permite deduzir expressões para a matriz dos coeficientes de reflexão das correntes.

Retomando-se a equação 3.28, isto é:

$$e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell} \cdot \underline{V}_r^{.f} = \underline{\underline{k}}_v \cdot e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell} \cdot \underline{V}_i^{.f} \tag{3.33}$$

e explicitando $\underline{V}_r^{.f}$, nesta última equação, resulta:

$$\underline{V}_r^{.f} = e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell} \cdot \underline{\underline{k}}_v \cdot e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell} \cdot \underline{V}_i^{.f} \tag{3.34}$$

que, substituida na equação 3.14, transforma esta última em:

$$\underline{V}_E^{.f} = (\underline{\underline{U}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}}) \cdot \underline{V}_i^{.f} \tag{3.35}$$

onde, por simplicidade, se faz:

$$\dot{\underline{\underline{\theta}}} = e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell} \cdot \underline{\underline{k}}_v \cdot e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell} \tag{3.36}$$

Nestas circunstâncias, as constantes de integração $\underline{V}_i^{.f}$ e $\underline{V}_r^{.f}$ calculam-se por:

$$\underline{V}_i^{.f} = (\underline{\underline{U}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}})^{-1} \cdot \underline{V}_E^{.f} \tag{3.37}$$

$$\underline{V}_r^{.f} = \dot{\underline{\underline{\theta}}} \cdot \underline{V}_i^{.f} = \dot{\underline{\underline{\theta}}} \cdot (\underline{\underline{U}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}})^{-1} \cdot \underline{V}_E^{.f} \tag{3.38}$$

Substituindo estes valores nas equações 3.9 e 3.12, é possível obter, após manipulações convenientes, as expressões:

$$\underline{V}^{f}(x) = (e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} + e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot \dot{\underline{\underline{\theta}}}).(\dot{\underline{\underline{U}}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}})^{-1} \cdot \underline{V}_E^{.f} \qquad (3.39)$$

$$\underline{I}^{.f}(x) = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot (e^{-\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} - e^{\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.x} \cdot \dot{\underline{\underline{\theta}}}).(\dot{\underline{\underline{U}}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}})^{-1} \cdot \underline{V}_E^{.f} \qquad (3.40)$$

Então, fazendo x=0, a equação 3.40 permite calcular as correntes no terminal emissor do sistema. Assim:

$$\underline{I}_E^{.f} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot (\dot{\underline{\underline{U}}} - \dot{\underline{\underline{\theta}}}).(\dot{\underline{\underline{U}}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}})^{-1} \cdot \underline{V}_E^{.f} \qquad (3.41)$$

Definindo agora a matriz de admitâncias de entrada do sistema a partir da relação

$$\underline{I}_E^{.f} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_{in} \cdot \underline{V}_E^{.f}$$

a equação 3.41 permite concluir que:

$$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{in} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot (\dot{\underline{\underline{U}}} - \dot{\underline{\underline{\theta}}}).(\dot{\underline{\underline{U}}} + \dot{\underline{\underline{\theta}}})^{-1} \qquad (3.42)$$

3.3 - A Forma Hiperbólica da Solução das Equações de Propagação

Geralmente, em função das facilidades computacionais disponíveis, torna-se conveniente trabalhar com as expressões das soluções dos sistemas de equações de propagação na forma hiperbólica. Nessas circunstâncias, o conjunto de equações 3.18 e 3.19, após agrupamentos convenientes, transforma-se em:

$$\underline{V}^{.f}(x) = \cosh(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{V}_E^{.f} - \operatorname{senh}(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{\underline{Z}}_C^{.} \cdot \underline{I}_E^{.f} \tag{3.43}$$

$$\underline{I}^{.f}(x) = - \underline{\underline{Y}}_C^{.} \cdot \operatorname{senh}(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{V}_E^{.f} + \underline{\underline{Y}}_C^{.} \cdot \cosh(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{\underline{Z}}_C^{.} \cdot \underline{I}_E^{.f} \tag{3.44}$$

Da mesma maneira, as equações 3.22 e 3.23 conduzem a

$$\underline{V}^{.f}(x) = \cosh(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{V}_R^{.f} + \operatorname{senh}(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{\underline{Z}}_C^{.} \cdot \underline{I}_R^{.f} \tag{3.45}$$

$$\underline{I}^{.f}(x) = \underline{\underline{Y}}_C^{.} \cdot \operatorname{senh}(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{V}_R^{.f} + \underline{\underline{Y}}_C^{.} \cdot \cosh(\underline{\underline{\Psi}}^{.}.x) \cdot \underline{\underline{Z}}_C^{.} \cdot \underline{I}_R^{.f} \tag{3.46}$$

3.4 - O Sistema de N-Condutores como um Quadripolo

Quando a natureza de um determinado tipo de problema só envolve o conhecimento e a determinação de quantidades nos dois extremos do sistema, então, torna-se bastante conveniente representar tal sistema através de um quadripolo equivalente.

Assim sendo, fazendo $x = \ell$, o conjunto de equações 3.43

e 3.44 ou 3.45 e 3.46, quando colocadas em forma matricial, fornecem respectivamente:

$$\begin{bmatrix} .f \\ \underline{V}_R \\ .f \\ \underline{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{A}}} & -\dot{\underline{\underline{B}}} \\ -\dot{\underline{\underline{C}}} & \dot{\underline{\underline{D}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .f \\ \underline{V}_E \\ .f \\ \underline{I}_E \end{bmatrix} \qquad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} .f \\ \underline{V}_E \\ .f \\ \underline{I}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{A}}} & \dot{\underline{\underline{B}}} \\ \dot{\underline{\underline{C}}} & \dot{\underline{\underline{D}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .f \\ \underline{V}_R \\ .f \\ \underline{I}_R \end{bmatrix} \qquad (3.48)$$

Nestas equações, $\dot{\underline{\underline{A}}}$, $\dot{\underline{\underline{B}}}$, $\dot{\underline{\underline{C}}}$ e $\dot{\underline{\underline{D}}}$ representam as constantes generalizadas do quadripolo equivalente do sistema, e definem-se por:

$$\dot{\underline{\underline{A}}} = \cosh(\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell) \qquad \dot{\underline{\underline{B}}} = \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell) \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_C$$

$$\dot{\underline{\underline{C}}} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell) \qquad \dot{\underline{\underline{D}}} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C.\cosh(\dot{\underline{\underline{\Psi}}}.\ell).\dot{\underline{\underline{Z}}}_C = \dot{\underline{\underline{A}}}_t$$

3.5 - A Solução Numérica via Transformação Modal

A solução numérica das equações deduzidas nos itens 3.2, 3.3 e 3.4 envolve o cálculo de funções da matriz $\dot{\underline{\underline{\Psi}}}$. Neste trabalho, tal cálculo foi efetuado recorrendo-se ao teorema da álgebra matricial que estabelece que, se for possível diagonalizar a matriz $\dot{\underline{\underline{\Psi}}}$ de forma a que

$$\dot{\underline{\underline{\Psi}}} = \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \dot{\underline{\underline{\gamma}}} \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \qquad (3.49)$$

então,

$$f(\dot{\underline{\underline{\Psi}}}) = \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot f(\dot{\underline{\underline{\gamma}}}) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \qquad (3.50)$$

Nas expressões anteriores,

$\dot{\underline{\underline{Q}}}$ → é a matriz modal de $\dot{\underline{\underline{\Psi}}}$;

$\dot{\underline{\underline{\gamma}}}$ → é a matriz diagonal dos valores próprios de $\dot{\underline{\underline{\Psi}}}$;

$\dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1}$ → é a matriz inversa de $\dot{\underline{\underline{Q}}}$.

A matriz modal $\dot{\underline{\underline{Q}}}$, que permite efetuar a transformação de semelhança definida na equação 3.49 tem um significado muito especial. De fato, a aplicação da propriedade expressa pela equação 3.50, à equação 3.9 por exemplo, permite escrever:

$$\dot{\underline{V}}^{f}(x) = \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot e^{-\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x} \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{V}}_{i}^{f} + \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot e^{\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x} \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{V}}_{r}^{f}$$

ou ainda:

$$\dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{V}}^{f}(x) = e^{-\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x} \cdot (\dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{V}}_{i}^{f}) + e^{-\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x} \cdot (\dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{V}_{r}^{f}) \qquad (3.51)$$

Definindo agora tensões componentes $\dot{\underline{V}}^{c}(x)$, $\dot{\underline{V}}_{i}^{c}$ e $\dot{\underline{V}}_{r}^{c}$ de tal forma que:

$$\underline{V}^{c}(x) = \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \underline{V}^{f}(x) \tag{3.52}$$

$$\underline{V}_i^{c} = \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \underline{V}_i^{f} \tag{3.53}$$

$$\underline{V}_r^{c} = \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \underline{V}_r^{f} \tag{3.54}$$

resulta de 3.51, que:

$$\underline{V}^{c}(x) = e^{-\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x} \cdot \underline{V}_i^{c} + e^{\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x} \cdot \underline{V}_r^{c} \tag{3.55}$$

Como as matrizes $e^{-\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x}$ e $e^{\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.x}$ são diagonais, a transformação definida nas equações 3.52 a 3.54, pela matriz modal $\dot{\underline{\underline{Q}}}$, permite passar de tensões de fase $\dot{\underline{V}}^{f}$, dependentes, para tensões componentes modais, $\dot{\underline{V}}^{c}$, independentes entre si.

Esta transformação é a base da chamada teoria modal de propagação. Segundo esta teoria, as colunas da matriz $\dot{\underline{\underline{Q}}}$ (vetores próprios da matriz $\dot{\underline{\underline{\Psi}}}$), representam estruturas de propagação que se mantêm invariáveis com a distância, e que se denominam de **modos de propagação.**

Por outro lado, como cada elemento $\dot{\gamma}_i$ da matriz $\dot{\underline{\underline{\gamma}}}$ (valor próprio da matriz $\dot{\underline{\underline{\Psi}}}$) se encontra associado a um único modo de propagação, a equação 3.55 permite interpretar tal elemento como a constante de propagação associada a tal modo.

Procedendo de modo inteiramente análogo, é possível definir uma matriz de transformação, $\dot{\underline{\underline{S}}}$, para as correntes. Esta

matriz pode ser calculada por[6]

$$\underline{\dot{S}} = \underline{\dot{Q}}_t^{-1} \tag{3.56}$$

Pode-se também demonstrar que as constantes de propagação associadas às colunas da matriz $\underline{\dot{S}}$ são idênticas as constantes de propagação das tensões.

A tabela 3.1 a seguir apresenta as colunas das matrizes $\underline{\dot{Q}}$ e $\underline{\dot{S}}$, modos de propagação das tensões e correntes, respectivamente, e as correspondentes constantes de propagação, e ainda as matrizes de impedâncias e admitâncias características mencionadas anteriormente. Estas matrizes foram calculadas a partir da linha de transmissão considerada na aplicação de cálculo dos parâmetros tratada no capítulo anterior.

A utilização da transformação definida pela equação 3.49, cujo significado acaba de ser sucintamente exposto, e a propriedade expressa na equação 3.50, permitem calcular as tensões e correntes, cujas expressões foram deduzidas anteriormente, através das seguintes equações:

TABELA 3.1 - PARAMETROS BASICOS DA LINHA

IMPEDANCIA CARACTERISTICA (OHM)

366.019 < -3.53	96.095 < -10.21	63.884 < -14.93
96.095 < -10.21	363.191 < -3.58	96.095 < -10.21
63.884 < -14.93	96.095 < -10.21	366.019 < -3.53

ADMITANCIA CARACTERISTICA (MILISIEMENS)

2.970 < 2.26	.699 < 177.04	.335 < 171.13
.699 < 177.04	3.120 < 2.04	.699 < 177.04
.335 < 171.13	.699 < 177.04	2.970 < 2.26

MODO NO.	AUTO-VETOR TENSAO	AUTO-VETOR CORRENTE	VELOCIDADE KM/SEG	ATENUACAO NP/KM	ATENUACAO DB/KM
	1.00000 .00	1.00000 0.00			
1	1.00767 .09	.90296 .15	220237.3	.000181	.001575
	1.00000 0.00	1.00000 .00			
	1.00000 -180.00	1.00000 -180.00			
2	.00000 96.18	.00000 129.54	291190.3	.000026	.000224
	1.00000 .00	1.00000 .00			
	.45148 -179.85	.50383 -179.91			
3	1.00000 0.00	1.00000 0.00	297378.8	.000027	.000231
	.45148 -179.85	.50383 -179.91			

3.5.1- Tensões e Correntes Fixadas na Emissão

$$\underline{\dot{V}}^{f}(x) = \frac{1}{2} \cdot \left[\underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot e^{-\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x} \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot (\underline{\dot{V}}_E^{f} + \underline{\underline{\dot{Z}}}_C \cdot \underline{\dot{I}}_E^{f}) \right. +$$

$$\left. + \underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot e^{\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x} \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot (\underline{\dot{V}}_E^{f} - \underline{\underline{\dot{Z}}}_C \cdot \underline{\dot{I}}_E^{f}) \right] \qquad (3.57)$$

e

$$\underline{\dot{I}}^{f}(x) = \frac{1}{2} \cdot \underline{\underline{\dot{Y}}}_C \cdot \left[\underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot e^{-\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x} \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot (\underline{\dot{V}}_E^{f} + \underline{\underline{\dot{Z}}}_C \cdot \underline{\dot{I}}_E^{f}) - \right.$$

$$\left. - \underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot e^{\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x} \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot (\underline{\dot{V}}_E^{f} - \underline{\underline{\dot{Z}}}_C \cdot \underline{\dot{I}}_E^{f}) \right] \qquad (3.58)$$

ou

$$\underline{\dot{V}}^{f}(x) = \underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot \cosh(\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x) \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot \underline{\dot{V}}_E^{f} -$$

$$- \underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot \operatorname{senh}(\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x) \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot \underline{\underline{\dot{Z}}}_C \cdot \underline{\dot{I}}_E^{f} \qquad (3.59)$$

e

$$\underline{\dot{I}}^{f}(x) = \underline{\underline{\dot{Y}}}_C \cdot \left[-\underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot \operatorname{senh}(\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x) \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot \underline{\dot{V}}_E^{f} + \right.$$

$$\left. + \underline{\underline{\dot{Q}}} \cdot \cosh(\underline{\underline{\dot{\gamma}}} \cdot x) \cdot \underline{\underline{\dot{Q}}}^{-1} \cdot \underline{\underline{\dot{Z}}}_C \cdot \underline{\dot{I}}_E^{f} \right] \qquad (3.60)$$

3.5.2- Tensões e Correntes Fixadas na Recepção

$$\dot{\underline{V}}^{f}(x) = \frac{1}{2}\left[\dot{\underline{Q}} \cdot e^{-\dot{\underline{\gamma}}.x} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot (\dot{\underline{V}}_R^{f} - \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}_R^{f}) + \right.$$

$$\left. + \dot{\underline{Q}} \cdot e^{\dot{\underline{\gamma}}.x} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot (\dot{\underline{V}}_R^{f} + \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}_R^{f})\right] \qquad (3.61)$$

e

$$\dot{\underline{I}}^{f}(x) = \frac{1}{2} \cdot \dot{\underline{Y}}_c \cdot \left[-\dot{\underline{Q}} \cdot e^{-\dot{\underline{\gamma}}.x} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot (\dot{\underline{V}}_R^{f} - \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}_R^{f}) + \right.$$

$$\left. + \dot{\underline{Q}} \cdot e^{\dot{\underline{\gamma}}.x} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot (\dot{\underline{V}}_R^{f} + \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}_R^{f})\right] \qquad (3.62)$$

ou

$$\dot{\underline{V}}^{f}(x) = \dot{\underline{Q}} \cdot \cosh(\dot{\underline{\gamma}}.x) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{V}}_R^{f} +$$

$$+ \dot{\underline{Q}} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\gamma}}.x) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}_R^{f} \qquad (3.63)$$

e

$$\dot{\underline{I}}^{f}(x) = \dot{\underline{Y}}_c \cdot \left[\dot{\underline{Q}} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\gamma}}.x) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{V}}_R^{f} + \right.$$

$$\left. + \dot{\underline{Q}} \cdot \cosh(\dot{\underline{\gamma}}.x) \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}_R^{f}\right] \qquad (3.64)$$

3.5.3- As Constantes do Quadripolo Equivalente

As constantes generalizadas do quadripolo equivalente do sistema exprimem-se agora por:

$$\dot{\underline{\underline{A}}} = \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \cosh(\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.\ell) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \qquad \dot{\underline{\underline{B}}} = \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.\ell) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_C$$

$$\dot{\underline{\underline{C}}} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.\ell) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \qquad \dot{\underline{\underline{D}}} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \cosh(\dot{\underline{\underline{\gamma}}}.\ell) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_C = \dot{\underline{\underline{A}}}_t$$

3.6 - Uma Aplicação: Representação de Transposições e Análise de Desequilíbrios

Uma análise das matrizes $\dot{\underline{\underline{Z}}}$ e $\dot{\underline{\underline{Y}}}$ definidas no capítulo anterior mostra claramente que embora as mesmas sejam simétricas, nem todos os elementos da diagonal principal ou fora da mesma são iguais entre si. Tal como é sobejamento conhecido, este fato faz com que, mesmo que a linha seja alimentada por um sistema equilibrado de tensões, as tensões e correntes ao longo da mesma apresentam desequilíbrios que variam com a carga tal como demonstram as figuras 3.1 e 3.2. Estas curvas foram calculadas utilizando as equações 3.59 e 3.60, descritas no item 3.5.1.

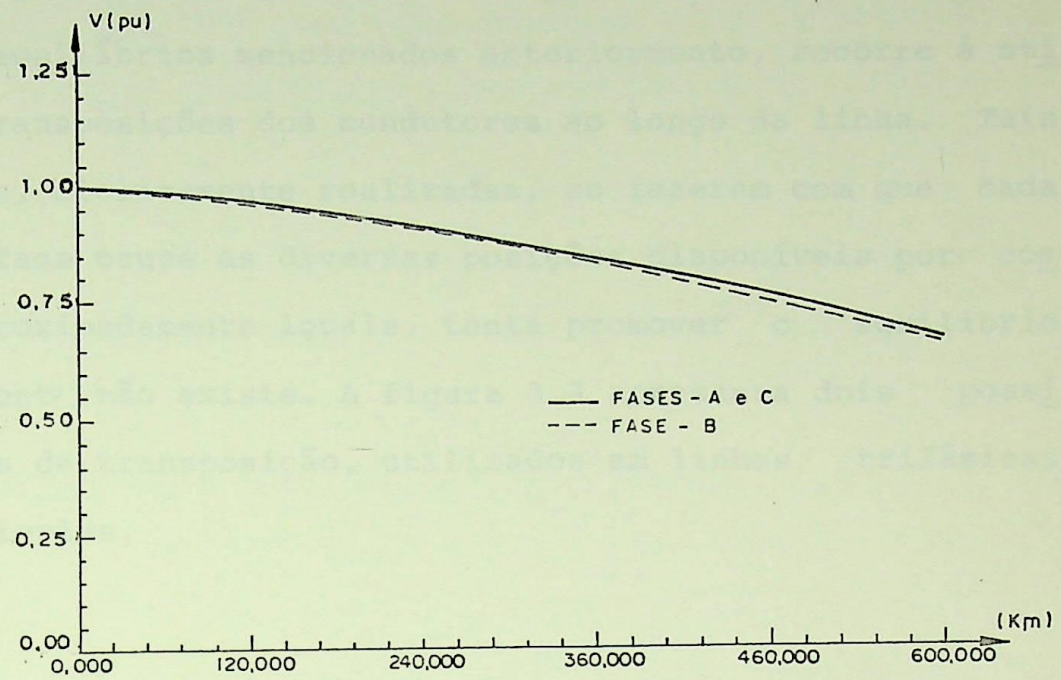


FIGURA 3.1 - PERFIS DAS TENSÕES; $P_2 = P_C$ COM FATOR DE POTÊNCIA IGUAL A 0,8 Indutivo.

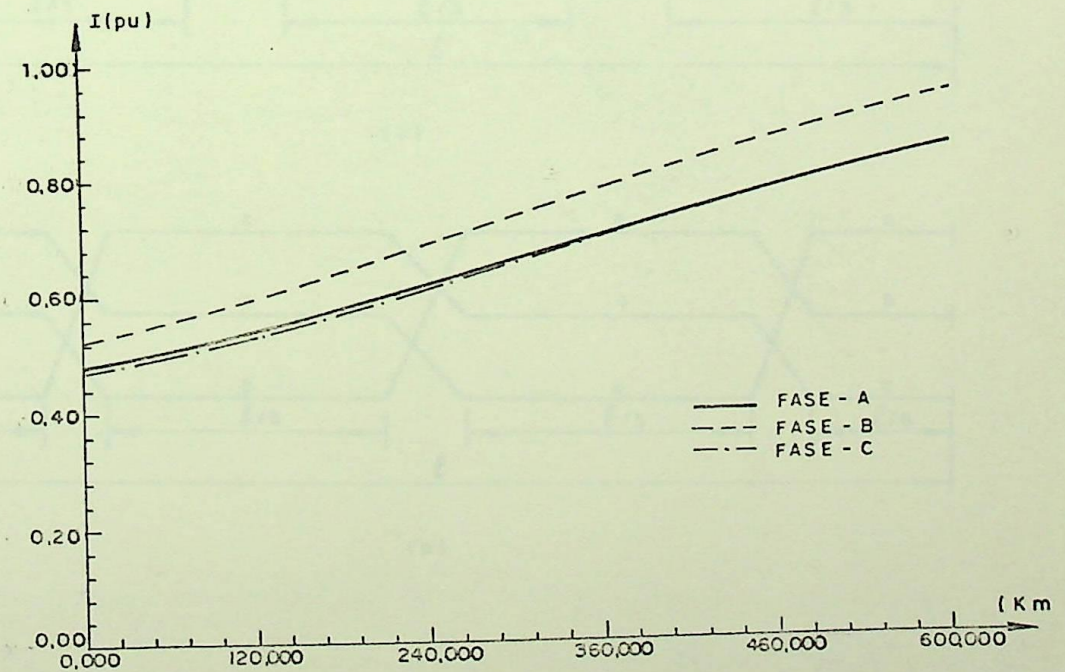


FIGURA 3.2 - PERFIS DAS CORRENTES; $P_2 = P_C$ COM FATOR DE POTÊNCIA IGUAL A 0,8 Indutivo.

Uma das medidas utilizadas na prática com o fim de minimizar os desequilíbrios mencionados anteriormente, recorre à utilização de transposições dos condutores ao longo da linha. Tais transposições, ciclicamente realizadas, ao fazerem com que cada condutor de fase ocupe as diversas posições disponíveis por comprimentos aproximadamente iguais, tenta promover o equilibrio que naturalmente não existe. A figura 3.3 apresenta dois possíveis esquemas de transposição, utilizados em linhas trifásicas a circuito simples.

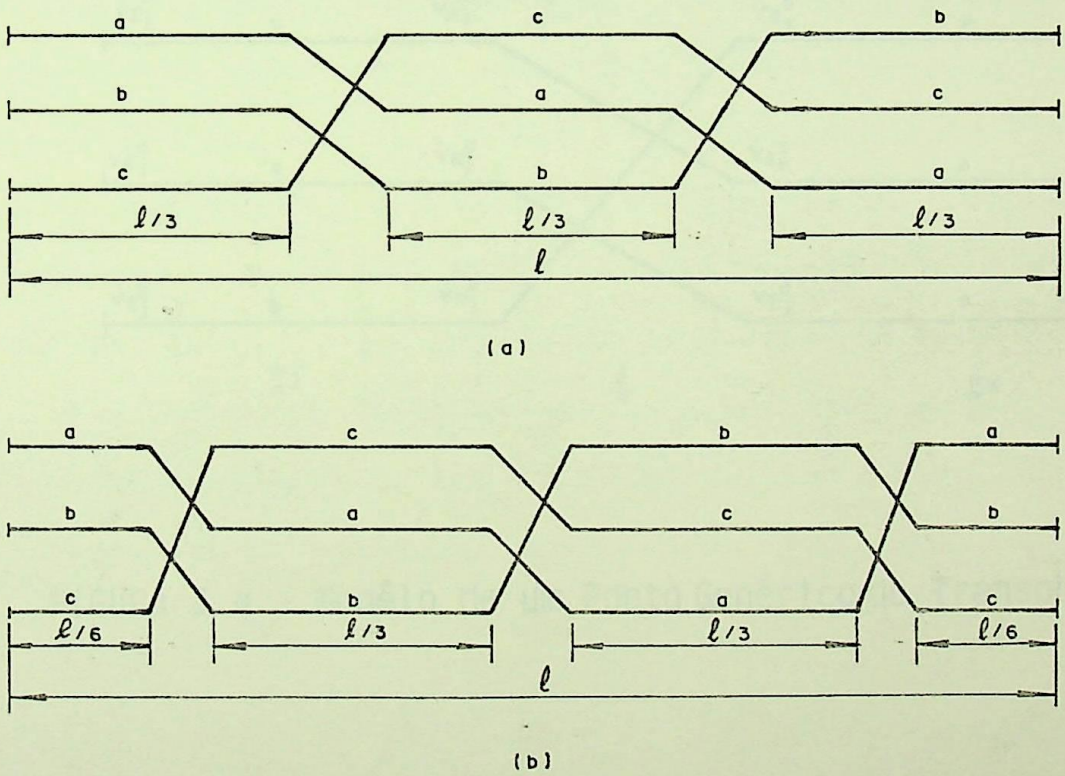


FIGURA 3.3 - Esquemas de Transposição de Condutores em Linhas Trifásicas a Circuito Simples.

3.6.1- Incorporação das Condições Impostas pelas Transposições às Equações do Quadripolo Representativo da Linha

A maneira mais usual de se representar os efeitos de uma transposição é através de uma matriz de conexão, construída de modo a refletir as posições dos condutores de fase antes e depois da mesma.

Considere-se a transposição descrita na figura 3.4 a seguir

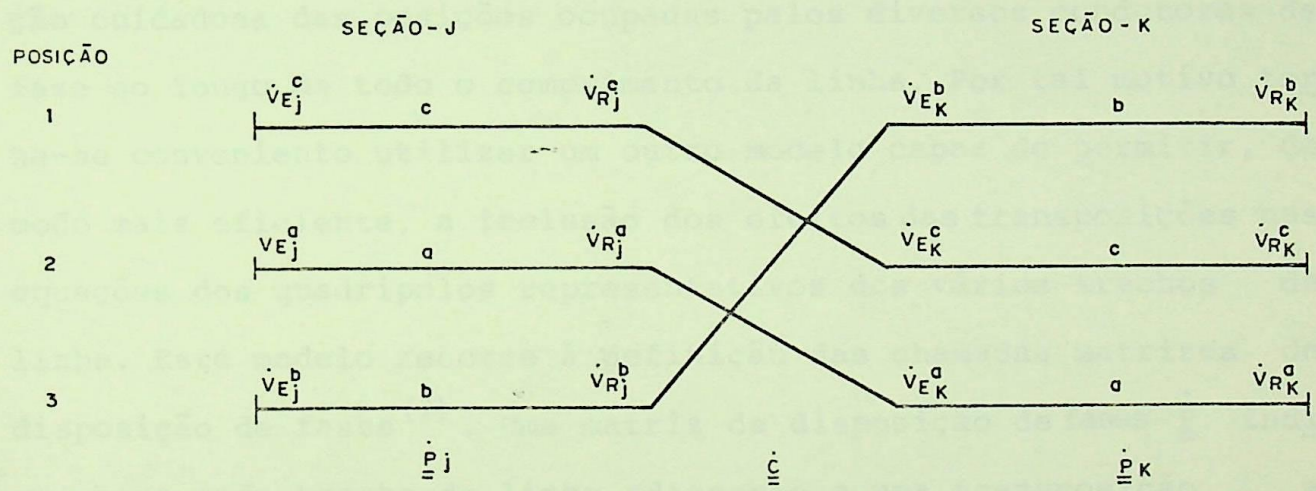


FIGURA 3.4 - Modêlo de um Ponto Genérico de Transposição

Facilmente se verifica que neste caso:

$$\underline{V}_{E_k}^{.bca} = \underline{\underline{C}}_{kj}^{.} \cdot \underline{V}_{R_j}^{.cab} \qquad (3.65)$$

onde a matriz de conexão $\underline{\underline{C}}_{kj}$ é dada por:

$$\dot{\underline{\underline{C}}}_{kj} = k$$

	j = 1	2	3
1			1
2	1		
3		1	

No entanto, a utilização de tais matrizes de conexão em conjunto com as equações de propagação exige uma contabilização cuidadosa das posições ocupadas pelos diversos condutores de fase ao longo de todo o comprimento da linha. Por tal motivo torna-se conveniente utilizar um outro modelo capaz de permitir, de modo mais eficiente, a inclusão dos efeitos das transposições nas equações dos quadripolos representativos dos vários trechos de linha. Este modelo recorre à definição das chamadas matrizes de disposição de fases[7]. Uma matriz de disposição de fases $\dot{\underline{\underline{P}}}$ indica, para cada trecho de linha adjacente a uma transposição, a forma pela qual as fases a, b e c, se distribuem pelas diversas posições disponíveis. Assim, as matrizes de disposição de fases para os trechos j e k da figura 3.4 são as seguintes:

$$\dot{\underline{\underline{P}}}_j =$$

	a	b	c
1			1
2	1		
3		1	

$$\dot{\underline{\underline{P}}}_k =$$

	a	b	c
1		1	
2			1
3	1		

Estas matrizes são construídas de tal forma que, para o trecho

genérico i,

$$P_{i(x,y)} = \begin{cases} 1, \text{ se a fase y ocupar a posição x;} \\ \\ 0, \text{ em qualquer outro caso;} \end{cases}$$

Sendo $x = 1,2,3$ e $y = a,b,c$.

Assim é possível escrever:

$$\underline{V}_j^{.cab} = \underline{\underline{P}}_j^{.} \cdot \underline{V}_j^{.abc} \tag{3.66}$$

e

$$\underline{V}_k^{.bca} = \underline{\underline{P}}_k^{.} \cdot \underline{V}_k^{.abc} \tag{3.67}$$

ou ainda, utilizando a propriedade que estabelece que a inversa de qualquer matriz de disposição de fases é idêntica à transposta correspondente, isto é:

$$\underline{V}_j^{.abc} = \underline{\underline{P}}_j^{.t} \cdot \underline{V}_j^{cab} \tag{3.68}$$

e

$$\underline{V}_k^{.abc} = \underline{\underline{P}}_k^{.t} \cdot \underline{V}_k^{.bca} \tag{3.69}$$

Então estas duas últimas equações permitem escrever:

$$\underline{V}_k^{.bca} = \underline{\underline{P}}_k^{.} \cdot \underline{\underline{P}}_j^{.t} \cdot \underline{V}_j^{.cab} \tag{3.70}$$

Comparando a equação anterior com a equação 3.65, é possível estabelecer uma relação entre a matriz de conexão $\underline{\underline{C}}_{kj}^{.}$ e as matrizes de disposição de fases $\underline{\underline{P}}_j^{.}$ e $\underline{\underline{P}}_k^{.}$. Na verdade, facilmente se verifica que:

$$\underline{\underline{C}}_{kj}^{.} = \underline{\underline{P}}_k^{.} \cdot \underline{\underline{P}}_j^{.t} \tag{3.71}$$

Recorrendo novamente à figura 3.4, pressupondo-se agora que se pretende calcular as tensões e correntes no ponto R da seção k em função dos valores conhecidos no ponto E da seção j. Este tipo de problema é facilmente resolvido através da representação, do trecho em estudo, por um quadripolo equivalente, que no caso deverá incorporar os efeitos da transposição. Assim, aplicando as equações do quadripolo à seção j, resulta:

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{V}_{Rj}^{.cab} \\ \hline \underline{I}_{Rj}^{.cab} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \underline{\underline{A}}^{.} & -\underline{\underline{B}} \\ \hline -\underline{\underline{C}}^{.} & \underline{\underline{D}}^{.} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \underline{V}_{Ej}^{.cab} \\ \hline \underline{I}_{Ej}^{.cab} \\ \hline \end{array} \tag{3.73}$$

Utilizando-se a equação 3.66 é possível escrever:

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{P}}}_j & \\ & \dot{\underline{\underline{P}}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{Rj} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{Rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{A}}}_j & \dot{-\underline{\underline{B}}}_j \\ \dot{-\underline{\underline{C}}}_j & \dot{\underline{\underline{D}}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{P}}}_j & \\ & \dot{\underline{\underline{P}}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{Ej} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{Ej} \end{bmatrix}$$

ou ainda

$$\begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{Rj} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{Rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .t\ \underline{\underline{P}}_j & \\ & .t\ \underline{\underline{P}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{A}}}_j & \dot{-\underline{\underline{B}}}_j \\ \dot{-\underline{\underline{C}}}_j & \dot{\underline{\underline{D}}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{P}}}_j & \\ & \dot{\underline{\underline{P}}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{V}}}_{Ej} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{Ej} \end{bmatrix} \qquad (3.74)$$

Finalmente,

$$\begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{Rj} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{Rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .t\ \dot{\underline{\underline{P}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{A}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_j & .t\ \dot{-\underline{\underline{P}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{B}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_j \\ .t\ \dot{-\underline{\underline{P}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{C}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_j & .t\ \dot{\underline{\underline{P}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{D}}}_j \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{Ej} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{Ej} \end{bmatrix} \qquad (3.75)$$

Seguindo um raciocínio absolutamente idêntico, é possível escrever para a seção k a seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{R_k} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{R_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .t\ \dot{\underline{\underline{P}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{A}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_k & .t\ \dot{-\underline{\underline{P}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{B}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_k \\ .t\ \dot{-\underline{\underline{P}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{C}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_k & .t\ \dot{\underline{\underline{P}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{D}}}_k \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} .abc\ \underline{\underline{V}}_{E_k} \\ .abc\ \underline{\underline{I}}_{E_k} \end{bmatrix} \qquad (3.76)$$

Como as tensões e correntes nas fases a, b e c são idênticas de um lado e de outro da transposição, então:

$$\begin{bmatrix} {}^{.abc}\underline{V}_{E_k} \\ {}^{.abc}\underline{I}_{E_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{.abc}\underline{V}_{Rj} \\ {}^{.abc}\underline{I}_{Rj} \end{bmatrix} \qquad (3.77)$$

Por isso, utilizando a equação 3.75 na equação 3.76, resulta:

$$\begin{bmatrix} {}^{.abc}\underline{V}_{R_k} \\ {}^{.abc}\underline{I}_{R_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{A}}}_{k,eq.} & -\dot{\underline{\underline{B}}}_{k,eq.} \\ -\dot{\underline{\underline{C}}}_{k,eq.} & \dot{\underline{\underline{D}}}_{k,eq.} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{\underline{A}}}_{j,eq.} & -\dot{\underline{\underline{B}}}_{j,eq.} \\ -\dot{\underline{\underline{C}}}_{j,eq.} & \dot{\underline{\underline{D}}}_{j,eq.} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^{.abc}\underline{V}_{Ej} \\ {}^{.abc}\underline{\underline{I}}_{Ej} \end{bmatrix} \qquad (3.78)$$

então, genericamente

$$\dot{\underline{\underline{A}}}_{i,eq.} = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{A}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i . \cosh\,(\dot{\underline{\underline{\Psi}}} . \ell_i) \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i$$

$$\dot{\underline{\underline{B}}}_{i,eq.} = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{B}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\Psi}}} . \ell_i) \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_c \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i$$

$$\dot{\underline{\underline{C}}}_{i,eq.} = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{C}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{Y}}}_c \cdot \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\Psi}}} . \ell_i) \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i$$

$$\dot{\underline{\underline{D}}}_{i,eq.} = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{D}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i = {}^{.t}\dot{\underline{\underline{P}}}_i \cdot \dot{\underline{\underline{Y}}}_c \cdot \cosh(\dot{\underline{\underline{\Psi}}} . \ell_i) \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_c \cdot \dot{\underline{\underline{P}}}_i$$

onde, ℓ_i é o comprimento do trecho i.

A equação anterior mostra então que o trecho em estudo pode ser matematicamente representado por uma composição em cascata de quadripolos equivalentes às seções j e k, com constantes calculadas pelas equações 3.75 e 3.76, respectivamente.

Se após o cálculo de $\underline{\dot{V}}^{.abc}_{R_k}$ e $\underline{\dot{I}}^{.abc}_{R_k}$, por exemplo, se pretende conhecer as tensões e correntes nos condutores correspondentes às posições 1, 2 e 3, no ponto R da seção k, basta aplicar o que descreve a equação 3.67, resultando:

$$\underline{\dot{P}}_k \cdot \underline{V}^{.abc}_{R_k} = \underline{V}^{.bca}_{R_k} \tag{3.79}$$

e

$$\underline{\dot{P}}_k \cdot \underline{I}^{.abc}_{R_k} = \underline{I}^{.bca}_{R_k} \tag{3.80}$$

No caso em que o cálculo da matriz de admitâncias de entrada de uma linha com transposições se torna conveniente, o mesmo pode agora ser feito sem nenhuma dificuldade. De fato, considere, por exemplo, o esquema de transposições mostrado pela figura 3.5.

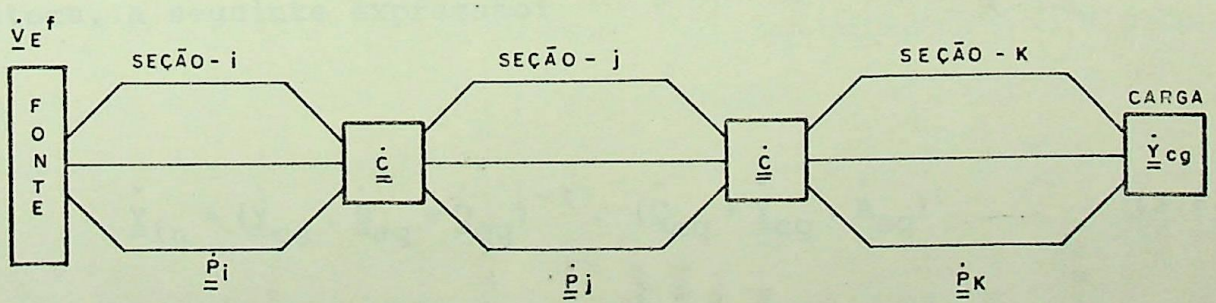


FIGURA 3.5 - Esquema de Transmissão com dois pontos de Transposição de Condutores.

Uma vez conhecidas as matrizes de disposição de fases nos trechos de linha i, j e k, o sistema pode ser representado por um quadripolo equivalente tal como descrito na figura abaixo:

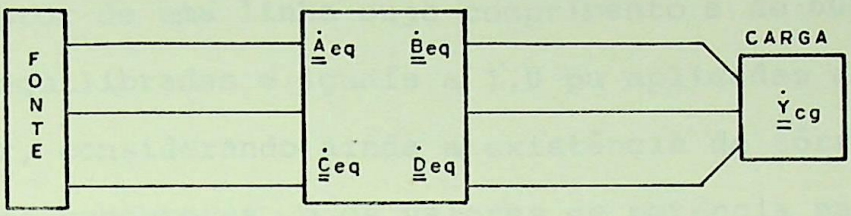


FIGURA 3.6 - Esquema de Transposição Equivalente a figura 3.5.

As constantes $\dot{\underline{\underline{A}}}_{eq}$, $\dot{\underline{\underline{B}}}_{eq}$, $\dot{\underline{\underline{C}}}_{eq}$ e $\dot{\underline{\underline{D}}}_{eq}$ são calculadas utilizando a teoria descrita anteriormente. As equações deste quadripolo, em conjunto com a relação

$$\dot{\underline{I}}^{f}_{R} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_{cg} \cdot \dot{\underline{V}}^{f}_{R} \qquad (3.81)$$

permitem calcular, para a matriz de admitâncias de entrada do sistema, a seguinte expressão:

$$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{in} = (\dot{\underline{\underline{Y}}}_{cg} \cdot \dot{\underline{\underline{B}}}_{eq} + \dot{\underline{\underline{D}}}_{eq})^{-1} \cdot (\dot{\underline{\underline{C}}}_{eq} + \dot{\underline{\underline{Y}}}_{cg} \cdot \dot{\underline{\underline{A}}}_{eq}) \qquad (3.82)$$

3.6.2- INFLUÊNCIA DAS TRANSPOSIÇÕES

Na tabela 3.2 apresentam-se alguns resultados referentes aos valores das tensões simples e correntes nos terminais emissor e receptor de uma linha cujo comprimento é de 600 km. Supondo tensões equilibradas e iguais a 1,0 pu aplicadas ao terminal transmissor, considerando ainda a existência de tôrres com transposições de condutores, e os valores de potência na recepção iguais a 0, 0,5 P_c, P_c e P_c com $\cos\psi=0,8$ indutivo, obtém-se a referida tabela.

A tabela 3.2 mostra ainda os resultados obtidos com a simulação de ambos esquemas de transposição de condutores apresentados anteriormente. Nota-se que estes resultados quando confrontados são muito próximos, portanto a utilização de duas tôrres com transposições de condutores, considerando-se apenas o efeito do equilíbrio das tensões e correntes, é mais vantajosa economicamente. Na referência (8), estudos específicos realizados demonstraram que conforme o carregamento, comprimento e números de ciclos de transposições utilizados, os desequilíbrios podem até piorar quando comparados com os de uma linha sem transposições, sob as mesmas condições de carga e mesmo comprimento. É o que ocorre, por exemplo, com as tensões na condição: $P_2=P_c$ com $\cos\psi=0,8$ indutivo, constante nesta última tabela. A referência anterior mostra ainda que a utilização de apenas um ciclo de transposições só é efetiva até um comprimento de linha de 625 km, isto é, à 60 hertz, equivalente a 1/8 do comprimento de onda, aproximadamente.

TABELA - 3.2

V_B = 750 kV S_B = 2138MVA (SIL)		SEM TRANSPOSIÇÕES				COM TRANSPOSIÇÕES							
						DUAS TORRES				TRÊS TORRES			
		$P_2 = 0$	$P_2 = 1/2P_c$	$P_2 = P_c$	$P_2 = P_c$ fp=.8ind	$P_2 = 0$	$P_2 = 1/2P_c$	$P_2 = P_c$	$P_2 = P_c$ fp=.8 ind	$P_2 = 0$	$P_2 = 1/2P_c$	$P_2 = P_c$	$P_2 = P_c$ fp= .8
$\dot{\underline{V}}_2$	A	1.42	1.24	.97	.68	1.38	1.26	1.02	.71	1.38	1.27	1.03	.71
		$-1,0^o$	$-27,2^o$	$-44,6^o$	$-25,0^o$	$-3,7^o$	$-28,9^o$	$-47,2^o$	$-28,6^o$	$-1,8^o$	$-27,9^o$	$-46,7^o$	$-28,1^o$
	B	1.36	1.23	.98	.68	1.39	1.23	.96	.66	1.40	1.24	.96	.66
		$-120,4^o$	$-145,6^o$	$-163,4^o$	$-147,6^o$	$-119,9^o$	$-147,4^o$	$-165,9^o$	$-148,7^o$	$-119,6^o$	$-147,4^o$	$-166,1^o$	-148.6^o
	C	1.39	1.24	.98	.71	1.41	1.22	.96	.71	1.39	1.19	.95	.70
		$118,6^o$	$93,5^o$	$75,7^o$	$87,5^o$	$120,7^o$	$96,2^o$	$79,7^o$	$91,6^o$	$118,6^o$	$95,3^o$	$79,5^o$	$91,2^o$
$\dot{\underline{I}}_2$	A	0.0	.60	.95	.83	0.0	.61	.98	.85	0.0	.62	.99	.85
		-	$-20,4^o$	$-37,8^o$	$-61,9^o$	-	-22.1^o	$-40,4^o$	$-65,5^o$	-	$-21,1^o$	$-39,9^o$	$-65,0^o$
	B	0.0	.66	1.05	.91	0.0	.66	1.02	.88	0.0	.66	1.03	.88
		-	$-144,4^o$	-162.2^o	$175,5^o$	-	$-146,2^o$	$-164,2^o$	$-174,4^o$	-	$-146,2^o$	$-164,9^o$	$174,4^o$
	C	0.0	.60	.96	.86	0.0	.59	.94	.86	0.0	.58	.92	.85
		-	$89,3^o$	$71,5^o$	$50,7^o$	-	$92,0^o$	$75,4^o$	$54,7^o$	-	$91,1^o$	$75,2^o$	$54,3^o$
$\dot{\underline{I}}_1$	A	.96	.96	.96	.45	.97	1.02	1.04	.49	.96	1.03	1.06	.51
		$94,4^o$	$42,0^o$	$6,7^o$	$-9,9^o$	$87,1^o$	$36,6^o$	$1,3^o$	$-15,1^o$	$88,3^o$	$37,7^o$	$2,5^o$	$-13,4^o$
	B	1.00	1.03	1.06	.55	.96	.98	1.00	.52	.97	1.00	1.02	.53
		$-30,5^o$	$-83,1^o$	$-119,0^o$	$-134,8^o$	$-30,0^o$	$-85,5^o$	$-121,9^o$	$-136,9^o$	$-29,6^o$	$-85,9^o$	$-122,6^o$	$-137,7^o$
	C	.95	.96	.97	.55	.98	.94	.94	.52	.97	.91	.91	.50
		$-156,1^o$	$151,8^o$	$115,9^o$	$98,9^o$	$-149,3^o$	$-158,8^o$	$123,1^o$	$106,0^o$	$-150,8^o$	$158,1^o$	$122,5^o$	$105,1^o$

As figuras 3.7 e 3.8 a seguir mostram os efeitos das transposições de condutores sobre os perfis de tensão e corrente apresentadas nas figuras 3.1 e 3.2, respectivamente, considerando a existência de três tôrres com transposição de condutores. Através do confrontamento entre estas e aquelas figuras, nota-se que a tentativa, aparentemente com êxito, de equilibrar as correntes, com reduções de 18,6% e 46,1% nas componentes de sequência zero e negativa, respectivamente, no terminal emissor implica num aumento nos desequilíbrios das tensões no terminal receptor, onde se verificaram aumentos de 76,9% e 67% nas componentes de sequência zero e negativa, a despeito dos desequilíbrios resultantes nas tensões ainda serem aceitáveis.

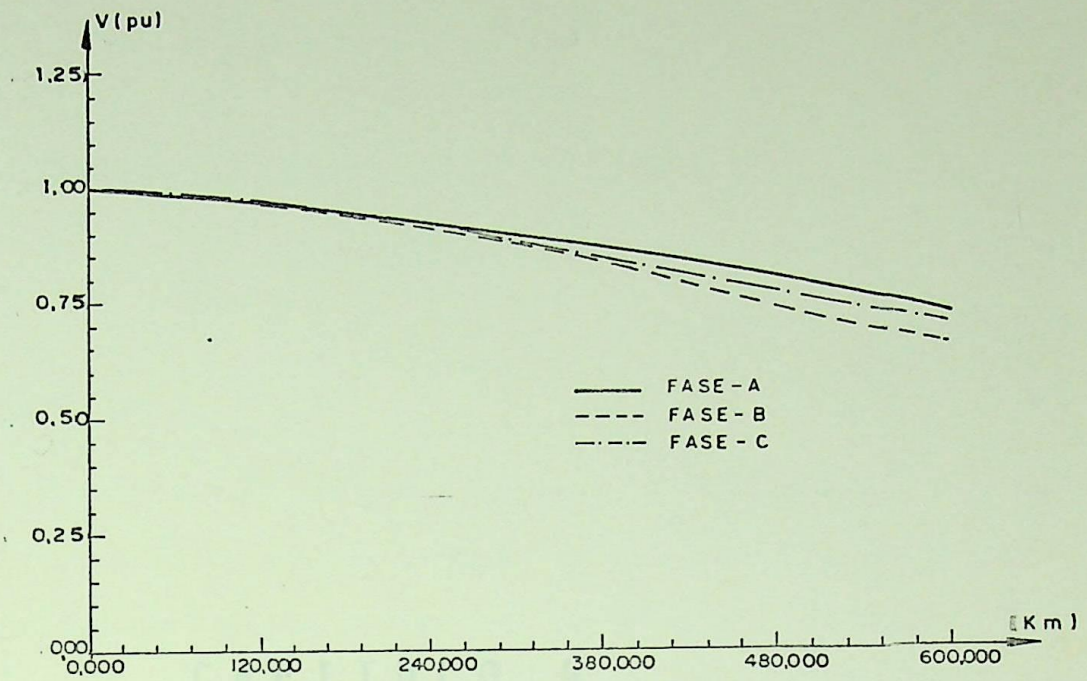


FIGURA 3.7 - PERFIS DAS TENSÕES; $P_2 = P_C$ COM FATOR DE POTÊNCIA IGUAL A 0,8 Indutivo (LINHA COM TRÊS TORRES DE TRANSPOSIÇÃO).

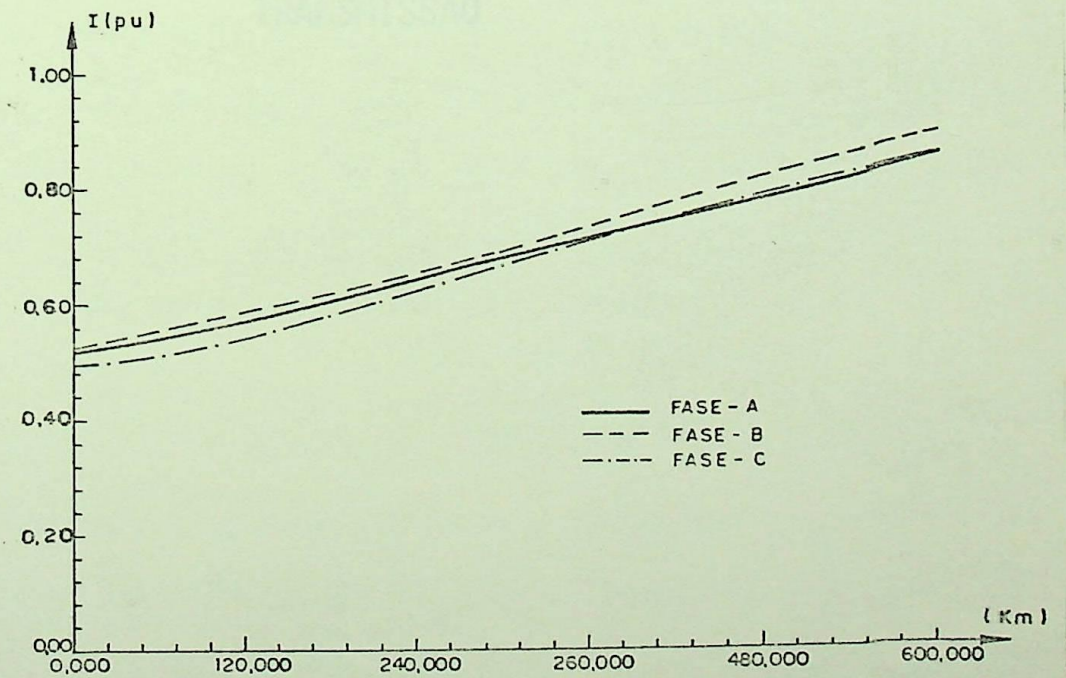


FIGURA 3.8 - PERFIS DAS CORRENTES; $P_2 = P_C$ COM FATOR DE POTÊNCIA IGUAL A 0,8 Indutivo (LINHA COM TRÊS TORRES DE TRANSPOSIÇÃO).

C A P I T U L O 4

COMPENSAÇÃO CONVENCIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

CAPITULO 4

COMPENSAÇÃO CONVENCIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

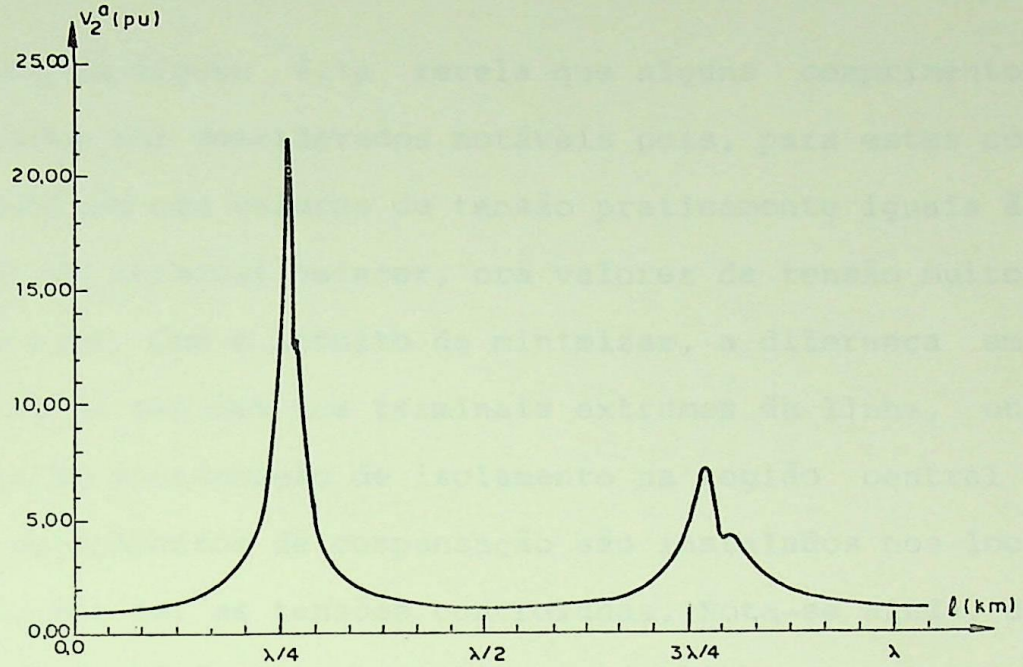
4.1 - INTRODUÇÃO

Sob a designação de Compensação Convencional incluem-se as formas de compensação hoje frequentemente utilizadas em linhas cujos comprimentos raramente excedem a 1000 Km: compensação em derivação por indutores, compensação em série por capacitores e compensação mista, quando as duas formas de compensação anteriores são utilizadas simultaneamente. Embora tal não se constitua num dos principais objetivos da dissertação, este capítulo tenta analisar os princípios que justificam tais tipos de compensação, descrever as formulações matemáticas básicas que permitem calcular os parâmetros de tais compensações e analisar alguns resultados obtidos, onde se destaca o cálculo das tensões e correntes em todas as fases, quer em linhas compensadas quer em linhas não compensadas em regime permanente.

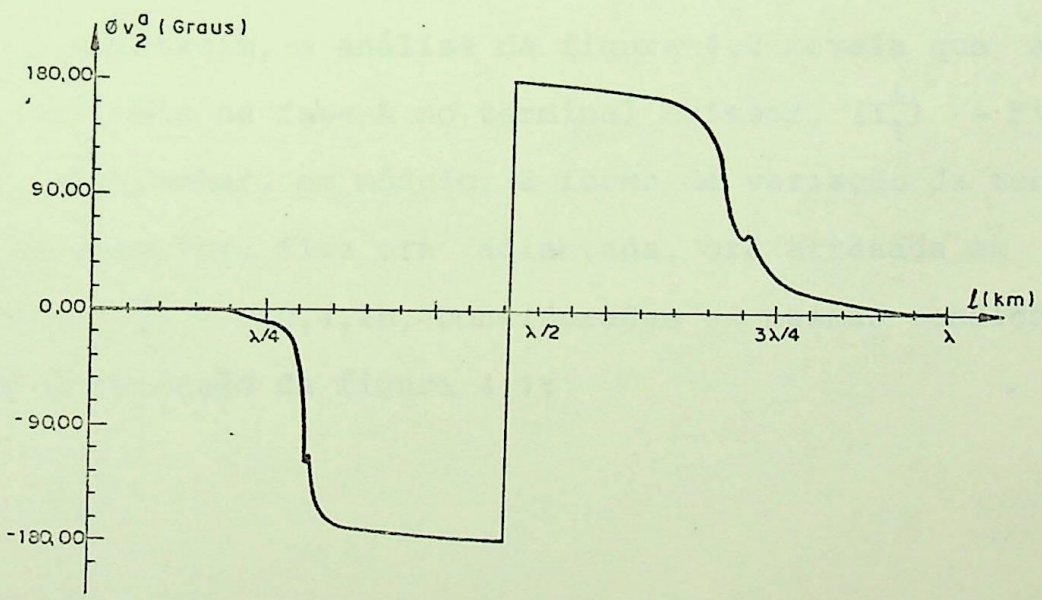
4.2 - TIPOS DE COMPENSAÇÃO E NATUREZA DOS PARÂMETROS

Na figura 4.1 apresentam-se as variações do módulo da tensão resultante na fase-A do terminal receptor, (V_2^a), e do ângulo de fase correspondente, ($\phi_{V_2}a$), de uma linha cujos parâmetros foram calculados nos capítulos anteriores, quando se mantêm as tensões no terminal emissor equilibradas e iguais, em módulo, a 1 pu. Estes diagramas foram obtidos fazendo variar o compri

mento da linha, operando em vazio, desde $\ell=0$ até $\ell=\lambda$, a 60 Hz.



(A)

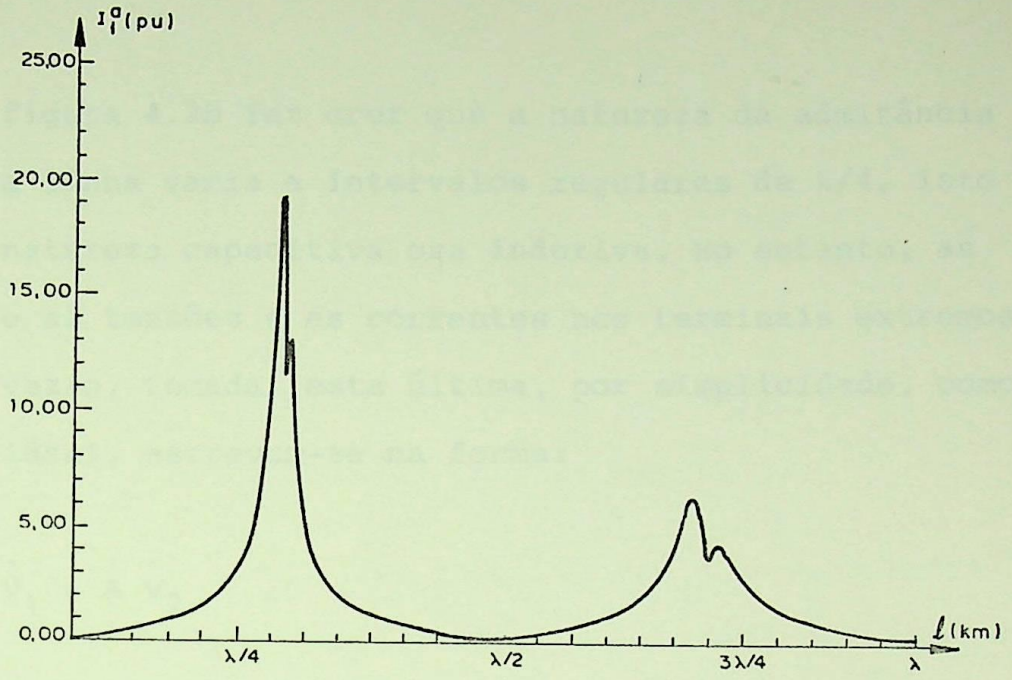


(B)

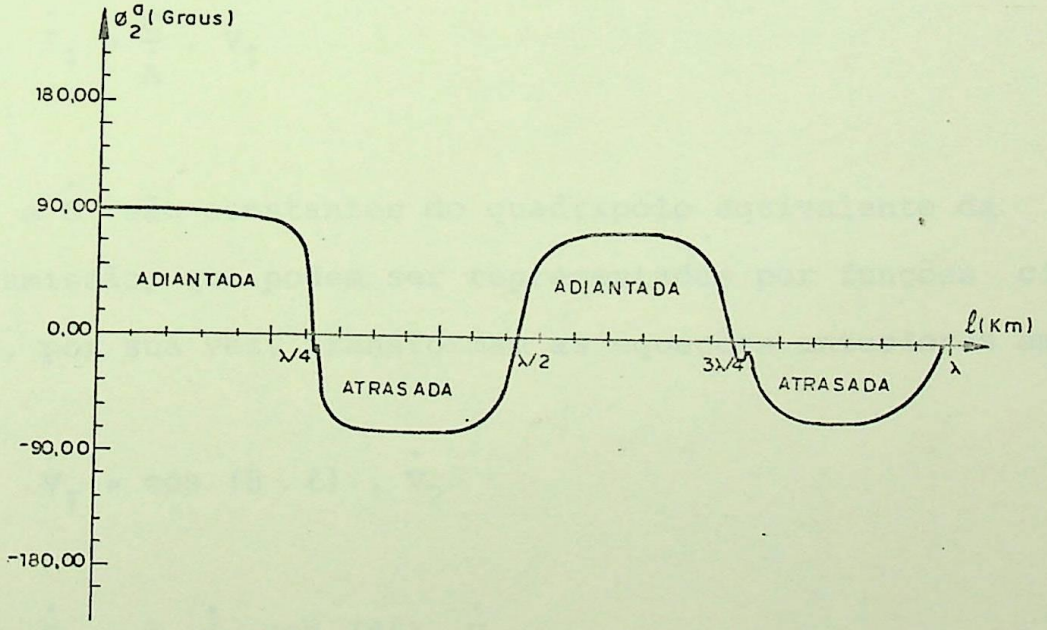
FIGURA 4.1 - (A) VARIAÇÃO DO MÓDULO DA TENSÃO NA FASE-A NO TERMINAL RECEPTOR.
(B) VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE DA TENSÃO NA FASE-A NO TERMINAL RECEPTOR,

A análise da figura 4.1a revela que alguns comprimentos de linha podem ser considerados notáveis pois, para estes comprimentos, resultam ora valores de tensão praticamente iguais à tensão aplicada ao terminal emissor, ora valores de tensão muito maiores que esta. Com o intuito de minimizar, a diferença em módulo, entre as tensões nos terminais extremos da linha, ou por questões de coordenação de isolamento na região central da linha, equipamentos de compensação são instalados nos locais onde se deseja ter as tensões controladas. Nota-se ainda, da Fig. 4.1b, que à medida que o comprimento da linha aumenta, o defasamento angular entre as tensões nos terminais emissor e receptor também aumenta.

Outrossim, a análise da figura 4.2 revela que a variação da corrente na fase-A no terminal emissor, (I_1^a) - Fig.4.2a, além de acompanhar, em módulo, a forma de variação da tensão no terminal receptor, fica ora adiantada, ora atrasada em relação à tensão, (V_1^a) - Fig.4.2b, consideradas as mesmas condições impostas na obtenção da figura 4.1.



(A)



(B)

FIGURA 4.2 - (A) VARIAÇÃO DO MÓDULO DA CORRENTE NA FASE-A NO TERMINAL EMISSOR

(B) VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE FASE DA CORRENTE NA FASE-A NO TERMINAL EMISSOR.

Assim, a figura 4.2b faz crer que a natureza da admitância de entrada da linha varia a intervalos regulares de $\lambda/4$, isto é, ora é de natureza capacitiva ora indutiva. No entanto, as relações entre as tensões e as correntes nos terminais extremos da linha em vazio, tomada esta última, por simplicidade, como um elemento ideal, escrevem-se na forma:

$$\dot{V}_1 = \dot{A}\,\dot{V}_2 \tag{4.1}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C}\,\dot{V}_2 \tag{4.2}$$

ou

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{C}}{\dot{A}} \cdot \dot{V}_1 \tag{4.3}$$

onde, $\dot{A}$ e $\dot{C}$ são constantes do quadripolo equivalente da linha de transmissão, que podem ser representadas por funções circulares que, por sua vez, transformam as equações anteriores em:

$$\dot{V}_1 = \cos(\beta \cdot \ell) \cdot \dot{V}_2 \tag{4.4}$$

$$\dot{I}_1 = j\,\frac{1}{Z_o}\,\text{sen}(\beta\ell) \cdot \dot{V}_2 \tag{4.5}$$

ou

$$\dot{I}_1 = j\,\frac{1}{Z_o} \cdot \tan(\beta\ell) \cdot \dot{V}_1 \tag{4.6}$$

onde

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \qquad (4.7)$$

e

ω - frequência angular, em rad/s ;

$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - impedância natural, em ohm ;

L e C - indutância longitudinal e capacitância transversal da linha, por unidade de comprimento, respectivamente.

Uma análise sobre a equação 4.4, posta sob a forma de um diagrama apresentado na figura 4.3 abaixo, permite obter as seguintes conclusões:

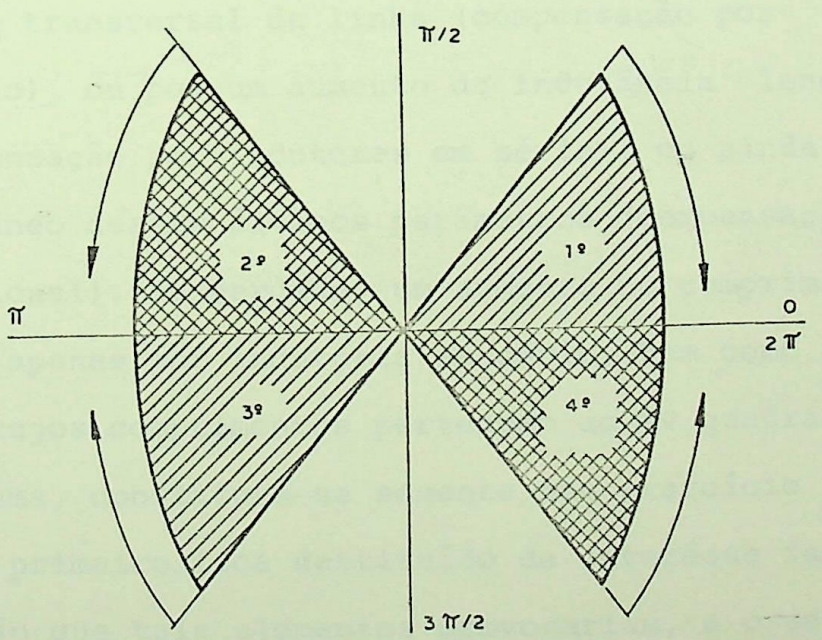


FIGURA 4.3 - DIAGRAMA AUXILIAR PARA DEFINIÇÃO DO TIPO DE COMPENSAÇÃO A UTILIZAR.

As linhas cujos comprimentos se situam nas regiões hachuradas nos quadrantes impares, devem sofrer um encurtamento elêtrico de tal forma a tornar a constante $\dot{A}$, em módulo, próximo á unidade. Tal efeito só é alcançado, ou através da diminuição da capacitância transversal da linha (compensação por indutores em derivação), ou através da diminuição da indutância longitudinal da linha (Compensação por capacitores em sêrie), ou ainda, através da diminuição simultânea de ambos os parâmetros (compensação mista convencional).

Por outro lado, as linhas cujos comprimentos se situam nas regiões hachuradas nos quadrantes pares, devem ter seu comprimento elétrico prolongado, uma vez que o efeito desejado, se alcançado, deve tornar as tensões nos terminais emissor e receptor próximas a 1 pu. Portanto, tal só é possível, ou por um aumento da capacitância transversal da linha (compensação por capacitores em derivação), ou por um aumento da indutância longitudinal da linha (compensação por indutores em série), ou ainda, por um aumento simultâneo destes últimos parâmetros (compensação mista não convencional). Na verdade, um aumento no comprimento elétrico da linha apenas por indutores em sêrie, bem como a existência de linhas cujos comprimentos pertençam ao 4º quadrante do referido diagrama, constituem-se somente num exercício teórico, uma vez, que o primeiro fica destituído de interêsse face às quedas de tensão que tais elementos provocariam, e o segundo, pela inexistência atual de linhas com tais comprimentos.

Um raciocínio semelhante ao anterior sobre a equação 4.6, permite concluir que a forma de variação do ângulo de fase da corrente no terminal emissor, $\phi^a_{I_1}$, estando a linha a vazio (Fig. 4.2b) está perfeitamente coerente com a teoria apresentada, uma vez que a função tangente têm um sinal positivo nos quadrantes ímpares e um sinal negativo nos quadrantes pares, o que resulta numa corrente no terminal emissor, (I^a_1), em avanço no 1º e 3º quadrante e em atraso no 2º e 4º quadrantes em relação à tensão no mesmo terminal, (V^a_1), respectivamente.

No entanto, uma questão que se apresenta como um desafio é a definição do limite ou faixa de comprimentos de linhas para os quais se permite optar por este ou aquele tipo de compensação. E ainda, se a opção por um dos tipos de compensação que faz variar o comprimento elétrico da linha é mais competitiva do que a transmissão em corrente contínua. Em alguns aspectos, tais expectativas serão atendidas nos capítulos seguintes.

4.3 - A Compensação em Derivação

É sobejamente conhecido que esta forma de compensação objetiva neutralizar os efeitos produzidos pelas susceptâncias das linhas quando estas estão operando em vazio ou em regime de carga leve. Desta forma, em pontos previamente escolhidos, instalam-se dispositivos em derivação cujo objetivo é manter as tensões em faixas operacionalmente aceitáveis face às variações da carga.

4.3.1- Cálculo dos Parâmetros da Compensação por Indutores em Derivação

Uma vez justificados os tipos de compensação em linhas e a natureza dos parâmetros, pressuponha-se a existência de dois bancos de indutores em derivação, por exemplo, um em cada extremidade da linha. A constante $\dot{A}_c$ do quadripolo representativo da linha compensada calcula-se por:[4,9]

$$\dot{A}_c = (\dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{Y}) = Kd \tag{4.8}$$

onde, Kd - representa o grau da compensação em derivação, ou seja, $Kd = V_1/V_2$. Desenvolvendo-se a equação anterior, o parâmetro de compensação fica definido por:

$$y'' = \frac{Kd - a'}{B} \cdot \text{sen}\beta_B + \frac{a''}{B} \cdot \cos\beta_B \tag{4.9}$$

onde, nesta última equação, as constantes $\dot{A}$ e $\dot{B}$ do quadripolo da linha estão representadas por:

$$a' + j\,a'' = \dot{A} \tag{4.10}$$

$$B\,e^{j\beta_B} = \dot{B} \tag{4.11}$$

e o parâmetro do banco de compensação por:

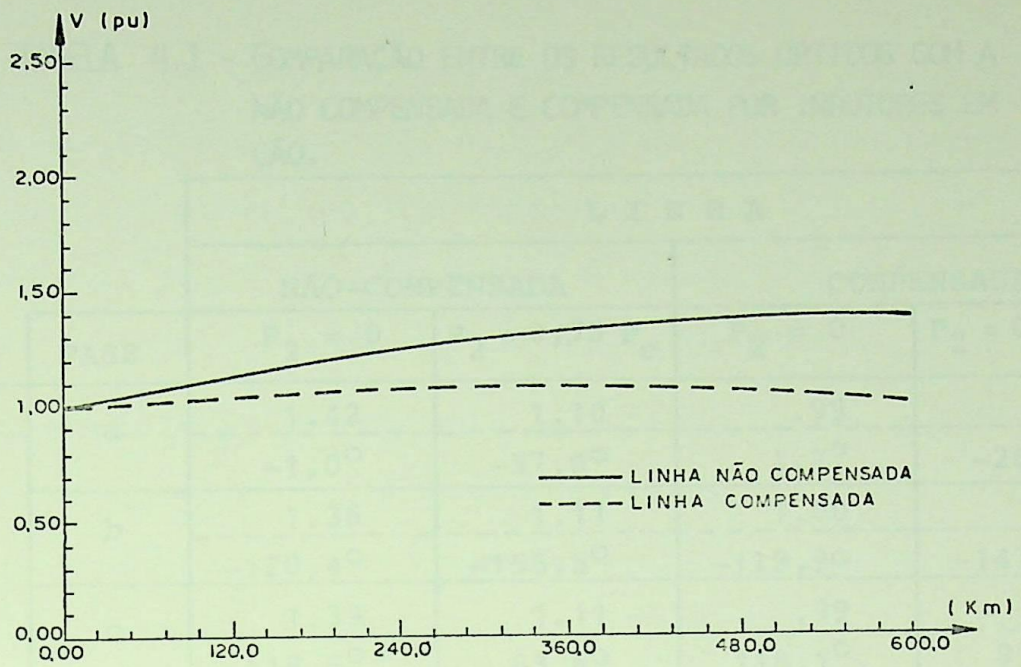
$$0 - j\,y'' = \dot{Y} \tag{4.12}$$

No entanto, é prática usual dimensionar os bancos de compensação a partir da susceptância total da linha. Tal procedimento faz com que os parâmetros dos bancos sejam conhecidos a partir do número de pontos onde se deseja controlar a tensão. Uma análise comparativa entre este último critério e aquele definido pela equação 4.8 será apresentada a seguir.

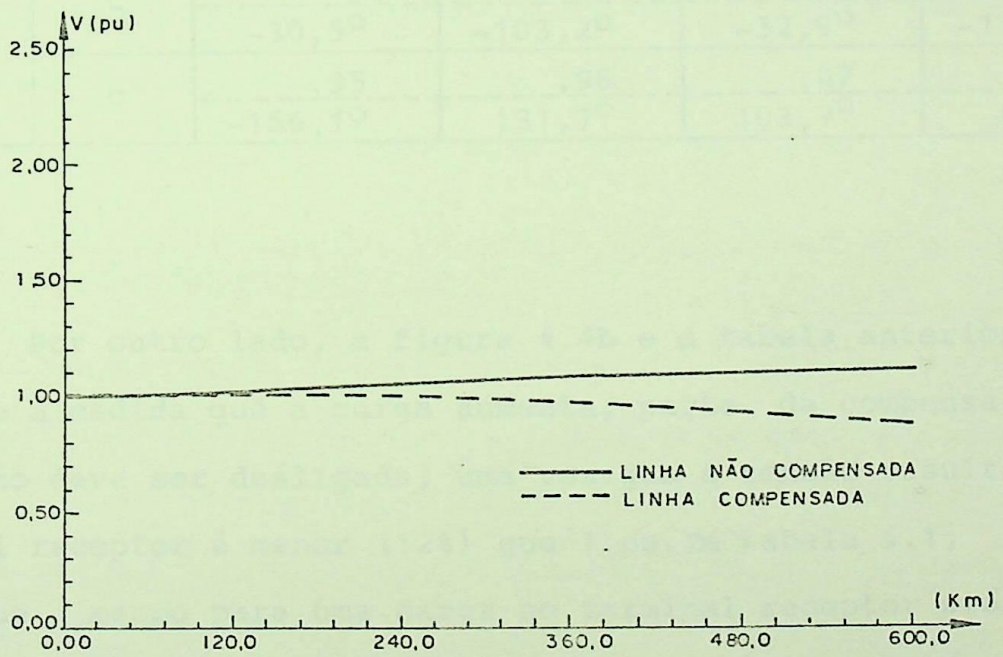
4.3.2- Análise de Alguns Resultados Relevantes

Na figura 4.4 encontram-se traçados os perfis de tensão (sequência positiva) de uma linha de comprimento igual, aproximadamente, a $\lambda/8$ Km, a 60 Hz, operando em vazio ($P_2=0$), Fig.4.4a, e em carga ($P_2 = 0,75\ P_c$), Fig.4.4b, quando se mantêm as tensões, no terminal emissor, equilibradas e iguais, em módulo, a 1 pu.

A análise da Fig.4.4a, associada à tabela 4.1 a seguir, revela a eficiência da compensação por indutores em derivação, calculados a partir da equação 4.9 (um banco em cada terminal, com Kd = 100%, da linha) quando se pretende manter as tensões nos terminais da linha em valores próximos a 1 pu. A tabela 4.1 mostra ainda que a existência da compensação consegue eliminar a sobre-elevação de tensão (42%) no terminal receptor da linha quando esta última estiver em vazio e sem compensação.



(A)



(B)

FIGURA 4.4 - (A) PERFIS DE TENSÃO (SEQUÊNCIA POSITIVA) NUMA LINHA A VAZIO (P_2=0), SEM COMPENSAÇÃO E COMPENSADA POR INDUTORES EM DERIVAÇÃO COM KD=100%.

(B) PERFIS DE TENSÃO (SEQUÊNCIA POSITIVA) NUMA LINHA EM CARGA (P_2=0,75 P_C), SEM COMPENSAÇÃO E COMPENSADA POR INDUTORES EM DERIVAÇÃO COM KD=100%.

TABELA 4.1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A LINHA NÃO COMPENSADA E COMPENSADA POR INDUTORES EM DERIVAÇÃO.

		LINHA			
		NÃO-COMPENSADA		COMPENSADA	
	FASE	$P_2 = 0$	$P_2 = 0{,}75\ P_c$	$P_2 = 0$	$P_2 = 0{,}75\ P_c$
$\dot{V}_2$ (pu)	a	1.42 / -1,0°	1.10 / -37,0°	.99 / 1,7°	.88 / -26,3°
	b	1.36 / -120,4°	1.11 / -155,5°	1.00 / -119,9°	.88 / -147,1°
	c	1.39 / 118,6°	1.11 / 83,6°	.99 / 118,1°	.86 / 91,4°
$\dot{I}_1$ (pu)	a	.96 / 94.4°	.96 / 22,2°	.07 / -163,5°	.58 / -22,1°
	b	1.00 / -30,5°	1.05 / -103,2°	.04 / -32,9°	.71 / -143,2°
	c	.95 / -156,1°	.96 / 131,7°	.07 / 103,7°	.70 / 87,7°

Por outro lado, a figura 4.4b e a tabela anterior faz crer que à medida que a carga aumenta, parte da compensação em derivação deve ser desligada, uma vez que a tensão resultante no terminal receptor é menor (12%) que 1 pu. Da tabela 4.1, nota-se ainda que mesmo para uma carga no terminal receptor próxima a potência característica da linha ($P_2 = 0{,}75\ P_c$), haverá uma sobre-elevação de tensão (11%) inadmissível no referido terminal, daí a necessidade de compensar a linha em carga.

Os bancos de indutores em derivação, calculados a partir da equação 4.9, estão dimensionados para fornecer com Kd = 100%, à ten

são nominal, potências reativas, por fase, por banco, iguais a 290 MVAr. No entanto, se tais bancos fôssem dimensionados segundo o critério alternativo, citado no sub-ítem 4.3.1, os mesmos seriam dimensionados para fornecer, á tensão nominal, potências reativas, por fase, por banco, iguais a 260 MVAr.

Portanto, a variação das tensões, em módulo, no terminal receptor da linha compensada, segundo um critério ou outro, seria cada vez maior à medida que o comprimento da linha aumentasse. Retomando-se o exemplo anterior a variação da tensão resultante no terminal receptor da linha em vazio seria de 4%. Felizmente, tais variações de tensão, face a um critério ou outro, só se tornam significativas a partir do momento em que o comprimento da linha aumenta ainda mais. Nestas circunstâncias, outras alternativas de compensação de linhas mostram-se mais vantajosas.

4.4 - A Compensação em Série

A utilização da compensação por capacitores em série em linhas de transmissão tem, por sua vez, o objetivo de minimizar os efeitos das reatâncias longitudinais das linhas quando estas estão em regime de carga pesada. Desta forma, a compensação em série permite, entre outras vantagens, aumentar o limite de estabilidade de um sistema para uma determinada potência a ser transmitida, consequentemente, substituir ou postergar, dentro de certos limites a construção de novas linhas.

4.4.1- Cálculo dos Parâmetros da Compensação por Capacitores em Série

De fato, a figura 4.6, a seguir, esclarece melhor os efeitos da compensação por capacitores em série em linhas de transmissão.

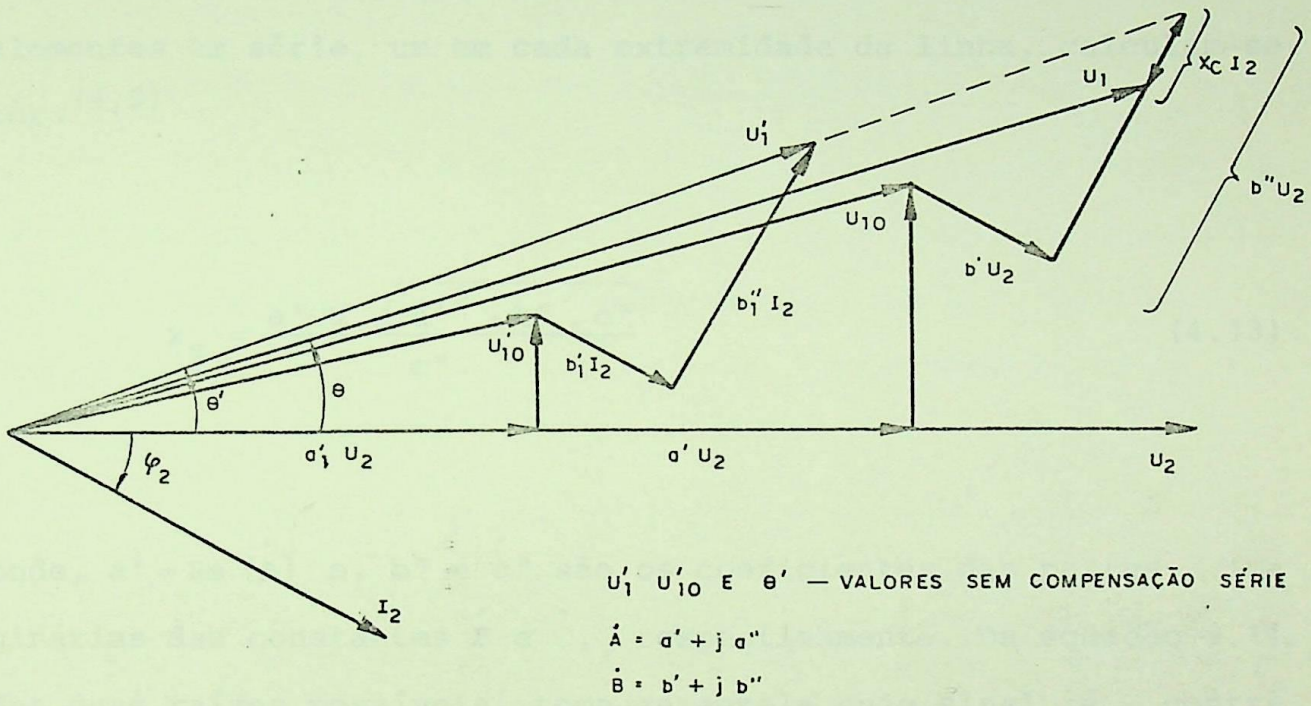


FIGURA 4.6 - Representação Fasorial da Equação do Quadripolo $\dot{U}_1 = \dot{A}\,\dot{U}_2 + \dot{B}\,\dot{I}_2$ para uma Linha Não Compensada e e Compensada em Série.

Através da análise da figura anterior, observa-se que a compensação por capacitores em série além de aumentar o limite de estabilidade dos sistemas de transmissão, para uma determinada potência a ser transmitida, por diminuição do ângulo θ', melhora a regulação da linha.

Existem vários arranjos e localizações possíveis para a instalação dos capacitores em série em sistemas de transmissão. Como exemplo, pressupondo-se a instalação de dois bancos em série, um em cada terminal da linha, a partir de considerações semelhantes feitas por ocasião do cálculo dos parâmetros da compensação em derivação, os parâmetros da compensação por dois elementos em série, um em cada extremidade da linha, calculam-se por:(4,9)

$$x_s = \frac{a' \pm \sqrt{a'^2 + b'' \cdot c''}}{c''} \qquad (4.13)$$

onde, $a' = \mathrm{Re}\{\dot{A}\}$ e, b" e c" são os coeficientes das partes imaginárias das constantes $\dot{B}$ e $\dot{C}$, respectivamente. Da equação 4.13, das duas raízes possíveis, toma-se aquela cujo sinal é contrário ao sinal da reatância longitudinal da linha. Então, face ao grau de compensação em sêrie e ser adotado - K_s, define-se o parâmetro do banco de compensação pela seguinte igualdade:

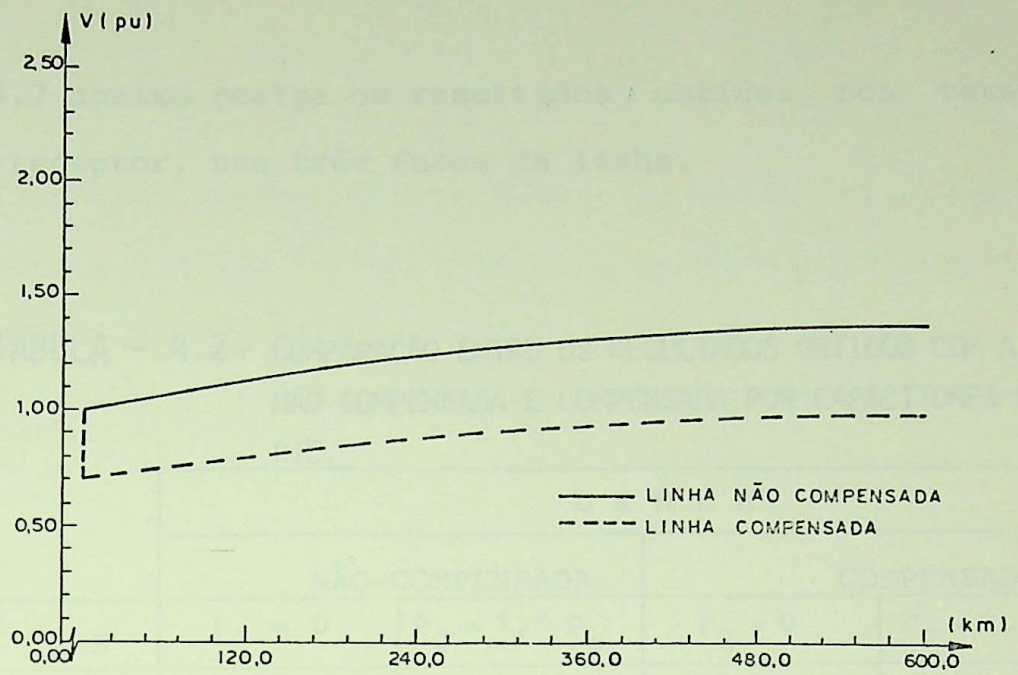
$$x_c = K_s \cdot x_s \qquad (4.14)$$

De forma semelhante à compensação em derivação, também é usual definir os parâmetros da compensação em série a partir da reatância longitudinal total da linha [10]. A comparação deste último critério, com aquele definido pela equação 4.14, será analisada nos itens seguintes.

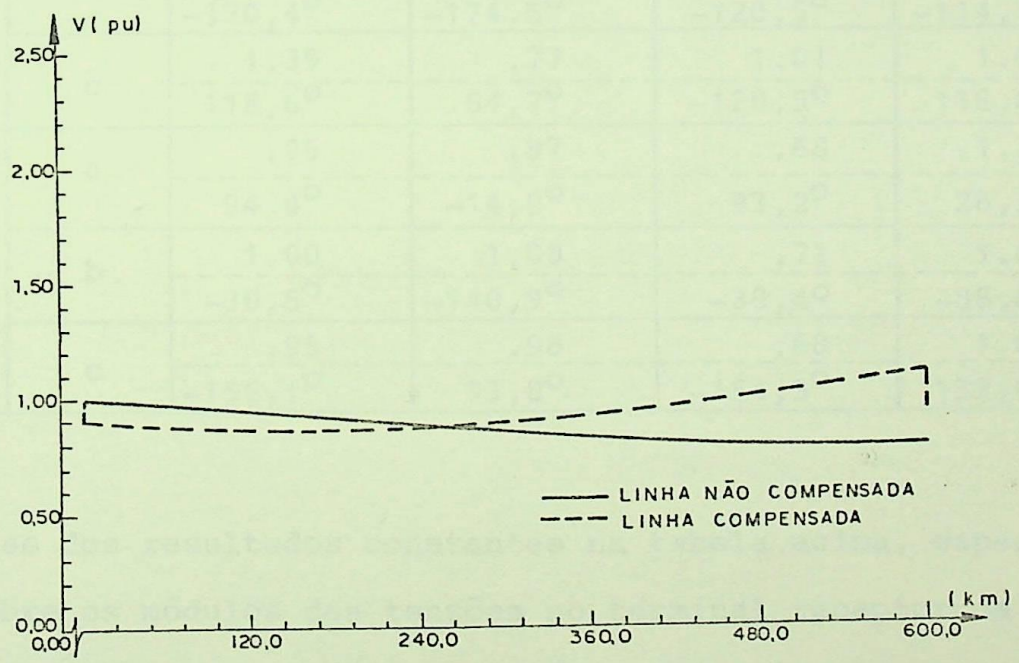
4.4.2- Análise de Alguns Resultados Relevantes

A figura 4.5 a seguir apresenta os perfis de tensão de sequência positiva ao longo da mesma linha, e sob as condições iniciais semelhantes às que foram consideradas nos estudos da compensação em derivação, exceto que em carga considerou-se uma potência transmitida igual a $P_2 = 1,5\ P_c$.

A análise da figura 4.5a mostra que a compensação por capacitores em série têm um resultado bastante semelhante à compensação por indutores em derivação, uma vez que, a compensação por capacitores em série também controla as tensões em pontos pré-definidos, independentemente da carga. Assim sendo, a figura 4.5b apresenta a maior vantagem da compensação por capacitores em série, ou seja, a de permitir operar as linhas com carregamentos superiores àquele que corresponde à sua potência característica.



(A)



(B)

FIGURA 4.5 - (A) PERFIS DE TENSÃO (SEQUÊNCIA POSITIVA) NUMA LINHA A VAZIO (P_2=0), SEM COMPENSAÇÃO E COMPENSADA POR CAPACITORES EM SÉRIE COM K_S = 100%.

(B) PERFIS DE TENSÃO (SEQUÊNCIA POSITIVA) NUMA LINHA EM CARGA (P_2=1,5 P_c), SEM COMPENSAÇÃO E COMPENSADA POR CAPACITORES EM SÉRIE COM K_S = 100%.

A tabela 4.2 abaixo realça os resultados obtidos nos terminais emissor e receptor, nas três fases da linha.

TABELA - 4.2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A LINHA NÃO COMPENSADA E COMPENSADA POR CAPACITORES EM SÉRIE.

		LINHA			
		NÃO-COMPENSADA		COMPENSADA	
	FASE	$P_2 = 0$	$P_2 = 1,5\ P_c$	$P_2 = 0$	$P_2 = 1,5\ P_c$
$\dot{V}_2$ (pu)	a	1.42 / $-1,0^o$	.77 / $-55,4^o$	1.02 / $-2,3^o$	.84 / $5,7^o$
	b	1.36 / $-120,4^o$	.78 / $-174,5^o$	.97 / $-120,5^o$	.92 / $-114,4^o$
	c	1.39 / $118,6^o$	.77 / $64,7^o$	1.01 / $-120,5^o$	1.04 / $118,6^o$
$\dot{I}_1$ (pu)	a	.96 / $94,4^o$	.97 / $-14,9^o$	.68 / $93,2^o$	1.36 / $28,3^o$
	b	1.00 / $-30,5^o$	1,08 / $-140,9^o$	.71 / $-30,4^o$	1.66 / $-88,8^o$
	c	.95 / $-156,1^o$	.98 / $93,8^o$	.68 / $-154,3^o$	1.67 / $139,0^o$

Uma análise dos resultados constantes na tabela acima, especificamente, sobre os módulos das tensões no terminal receptor da linha quando esta opera com uma carga que é superior àquela que corresponde à sua potência característica, chama a atenção pelo desequilíbrio resultante, uma vez que o dimensionamento dos capacitores em série foi feito pressupondo uma linha perfeitamente equilibrada. Como na linha simulada neste exemplo não foram consideradas eventuais transposições de condutores, os valores obtidos para as tensões naquele terminal aparecem naturalmente desequilibra

dos.

Por outro lado, os bancos de capacitores em série, calculados a partir da equação 4.14 (um banco em cada terminal da linha), estão dimensionados para fornecer com $K_S = 100\%$, à corrente correspondente à potência característica da linha, potências reativas, por fase, por banco, iguais a 295 MVAr, independentemente do critério utilizado para definir o grau da compensação em série.

4.5 - A Compensação Mista

Face às vantagens comprovadas nos ítens anteriores no que se refere ao desempenho das linhas compensadas por indutores em derivação, com a linha em vazio ou em regime de carga leve, ou por capacitores em série, com a linha em regime de carga pesada, é de se acreditar que a utilização simultânea de ambas as compensações flexibilizará bastante a operação das linhas numa ampla faixa de potências transmitidas. Assim, a compensação mista apresenta-se como a solução para os inconvenientes das compensações acima referidas quando aplicadas isoladamente.

4.5.1- Cálculo dos Parâmetros da Compensação por Capacitores em Série e Indutores em Derivação

Em conformidade com as recomendações constantes na referência (10), o capacitor em série deve ser instalado entre o reator de linha e a subestação terminal, de modo a evitar a possibilidade da formação de um circuito ressonante por ocasião do desligamento da linha de transmissão. Assim, uma formulação que contabiliza, simultaneamente, os efeitos da compensação em série e derivação recai, invariavelmente, em sistemas de equações cuja solução é bastante trabalhosa. No entanto, se os parâmetros da compensação em série e em derivação forem calculados, por exemplo, segundo as equações 4.9 e 4.14 já apresentadas, e ainda, se tais configurações forem superpostas de tal forma a reproduzir os efeitos desejados, então o comportamento elétrico da linha resulta bastante satisfatório. Sob tais perspectivas, alguns resultados serão analisados a seguir.

4.5.2- Análise de Alguns Resultados Relevantes

A tabela 4.3 abaixo mostra alguns resultados obtidos com a linha compensada por indutores em derivação, com k_d = 100%, e capacitores em série, com k_s = 100%. Estes últimos instalados entre os reatores de linha e as subestações nos terminais emissor e receptor da referida linha.

TABELA 4.3 - Resultados obtidos com linha compensada por indutores em derivação e capacitores em série.

		COMPENSAÇÃO MISTA		
		SÉRIE (k_s=100%) E SHUNT (k_d=100%)		
	FASE	P_2=0	P_2 = 0,75 P_c	P_2 = 1,5 P_c
$\dot{V}_2$ (pu)	a	1.01 / .2°	.93 / 3,2°	.86 / 5,6°
	b	.98 / -119,2°	.96 / -112,0°	.92 / -105,0°
	c	1.00 / 119,7°	1.02 / 124,2°	1.03 / 128,7°
$\dot{I}_1$ (pu)	a	.07 / -163,0°	.61 / 8,9°	1.18 / 11,8°
	b	.03 / -34,4°	.77 / -108,6°	1.48 / -102,8°
	c	.07 / 103,9°	.82 / 118,6°	1.56 / 123,5°

Nota-se na tabela acima que os valores de tensão resultantes no terminal receptor da linha, apresentam-se, de um modo geral, mais satisfatórios que aqueles constantes nas tabelas 4.1 e 4.2 que, por sua vez, foram obtidos a partir das compensações por induto

res em derivação e capacitores em série, respectivamente, aplicadas isoladamente. No entanto, em carga (P_2=0,75 P_c e P_c = 1,5 P_c), os valores de tensão no terminal receptor ainda se apresentam inaceitáveis, daí a necessidade de se alterar o grau da compensação em derivação e em série, conforme as necessidades operativas da linha. Neste sentido, a tabela 4.4 a seguir apresenta os resultados obtidos com a linha em carga (P_2 = 0,75 P_c), para outros percentuais de compensação em derivação e em série.

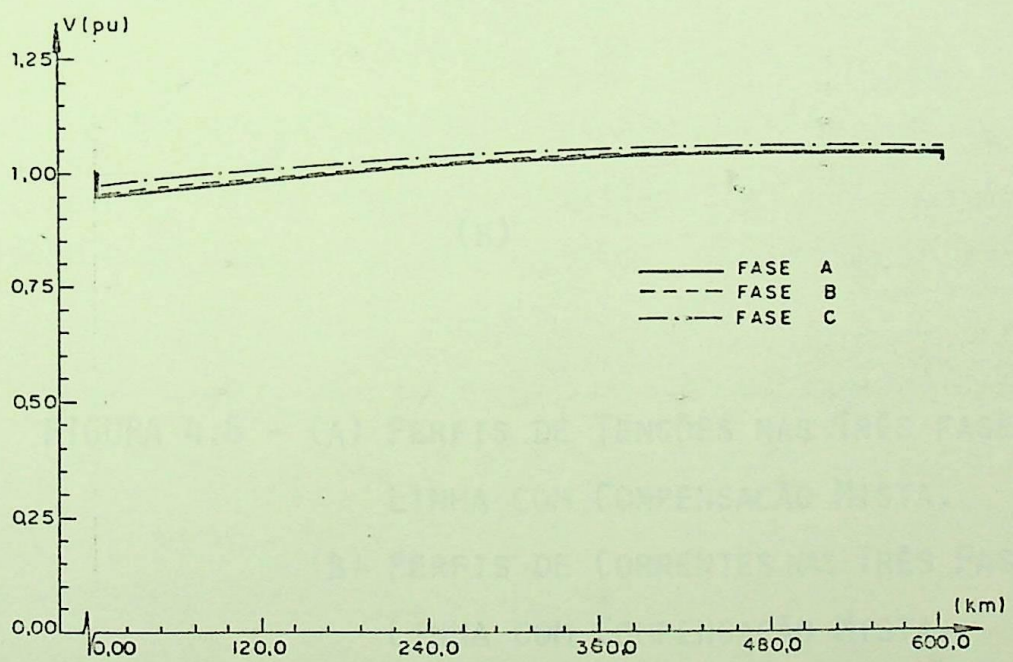
TABELA 4.4 - COMPENSAÇÃO MISTA
(SÉRIE - K_S = 40%/SHUNT - K_D = 80%)

	FASES	P_2=0,75 P_c
$\dot{V}_2$ (pu)	a	1.02 / -20,6°
	b	1.04 / -138,1°
	c	1.06 / 99,6°
$\dot{I}_1$ (pu)	a	.83 / 24,8°
	b	.95 / -99,9°
	c	.88 / 132,2°

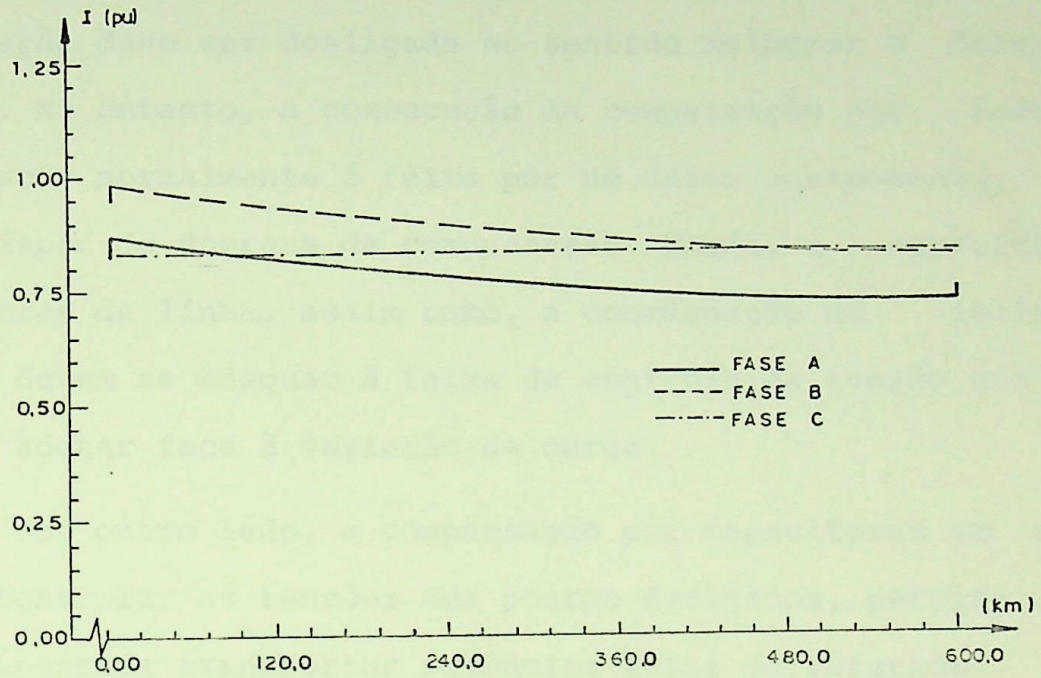
Observa-se na tabela anterior que, pelas mesmas razões já expostas, a despeito de uma ligeira melhora nos valores das tensões

no terminal receptor da linha, os resultados aparecem ainda naturalmente desequilibrados. Quanto aos carregamentos superiores à potência característica da linha, a parcela da compensação mista que corresponde à compensação por indutores em derivação deve ser compensada. Uma vez que tal situação corresponde à compensação só por capacitores em série, então os resultados já foram apresentados na tabela 4.2.

Para ilustrar esta aplicação, apresentam-se a seguir, nas figuras 4.6a e 4.6b, os perfis de tensões e correntes nas três fases da linha compensada conforme as condições estabelecidas na tabela anterior.



(A)



(B)

FIGURA 4.6 - (A) PERFIS DE TENSÕES NAS TRÊS FASES DA LINHA COM COMPENSAÇÃO MISTA.
(B) PERFIS DE CORRENTES NAS TRÊS FASES DA LINHA COM COMPENSAÇÃO MISTA.

4.6 - CONCLUSÕES

Da análise da tabela 4.1 observa-se que à medida que a carga no terminal receptor da linha aumenta, parte da compensação em derivação deve ser desligada no sentido melhorar o desempenho da linha. No entanto, a consecução da compensação por indutores em derivação normalmente é feita por um único equipamento, daí não se dispor de degraus de compensação. Então, a especificação dos reatores de linha, assim como, a coordenação de isolamento da mesma devem se adequar à faixa de controle de tensão que se pretende adotar face à variação da carga.

Por outro lado, a compensação por capacitores em série, além de controlar as tensões nos pontos desejados, permite à linha compensada transportar potências acima do referido valor de P_C, conforme pode ser constatado na tabela 4.2 e nas figuras 4.5a e b. Então, porque não utilizar a compensação por capacitores em série em substituição à compensação por indutores em derivação, ou mesmo, porque utilizar a compensação mista convencional ? As respostas a estas questões decorrem das análises efetuadas em regime transitório de funcionamento de tais linhas que apontam, normalmente, problemas de sobretensões durante a sua energização, bem como a possibilidade da ocorrência de ressonância sub-síncrona.

Convém realçar também que, no caso estudado, as variações observadas entre os resultados obtidos face à utilização de critérios diferenciados no dimensionamento dos parâmetros de compensação, quer por indutores em derivação, quer por capacitores

em série, em princípio, são irrelevantes.

No Anexo IV encontram-se disponíveis outras configurações que permitem estudar as compensações de linhas apresentadas neste capítulo.

CAPITULO 5

COMPENSAÇÃO NAO CONVENCIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

CAPITULO 5

COMPENSAÇÃO NÃO CONVENCIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

5.1 - INTRODUÇÃO

A disponibilidade de enormes mananciais hidráulicos ainda inaproveitados na região Norte do Brasil apontam para o fato de que esta região, a média prazo, se transforme numa região não só auto-suficiente, mas principalmente, exportadora de energia para outras regiões sôcio-economicamente mais evoluídas, tais como as regiões Nordeste, Sudeste e Sul. A transmissão de grandes blocos de energia elétrica através de distâncias que podem superar os 2000 km apresenta-se como um desafio para o setor elétrico brasileiro. Os estudos de viabilidade vislumbram duas alternativas distintas: a transmissão em corrente contínua a tensões de ± 600 kV ou superiores e a transmissão em corrente alternada em muito alta tensão, em alguns casos superior a 1000 kV. Neste último caso, geralmente, uma das primeiras decisões a serem tomadas corresponde ao tipo de compensação a ser utilizada, de modo a garantir um desempenho satisfatório da linha de transmissão numa faixa razoável de potências transmitidas. Neste sentido, este capítulo analisa uma das soluções que vêm sendo contempladas pelo setor elétrico brasileiro e que recorre à utilização de uma compensação não convencional, capaz de permitir a operação das linhas na faixa de meio comprimento de onda. Nota-se desde já que, a 60 Hz, as distâncias supra-citadas estão muito próximas do

meio comprimento de onda de propagação. Somente por este aspecto os investimentos em equipamentos de compensação, quando necessários, seriam mínimos se comparados com outros tipos de compensação convencional resultando, portanto, numa diminuição dos custos de transmissão.

No entanto, a transmissão de energia por linhas com comprimento natural igual ao meio-comprimento de onda, ou compensadas para tal, apresenta em princípio duas limitações, relevantes: a impossibilidade de alimentação de cargas intermediárias e o aparecimento de sobretensões inadimissíveis por ocasião do transporte de potências superiores à potência característica da linha. Assim sendo, este capítulo apresenta ainda uma solução para as limitações mencionadas que recorre à utilização de um outro tipo de compensação não convencional, denominada neste trabalho de Compensação para Potência Característica.

5.2 - A Compensação para Meia-Onda

Embora não se tenha conhecimento da existência de linhas de transmissão de energia elétrica compensadas para meia-onda, a proposta para utilização deste tipo de compensação já data de algumas décadas [11-15]. No Brasil, no entanto, tal proposta só começou a ser descutida, no âmbito das empresas de energia elétrica, [16,17,25] mais recentemente e em função das distâncias, que se verificam crescentes, das fontes primárias de energia aproveitável em relação aos centros ou regiões consumidoras. Assim sendo, a compensação das linhas para meia-onda apresenta-se como uma das alternativas para a transmissão de energia da Amazônia,

e como tal, será tratada ao longo do presente capítulo.

5.2.1- Cálculo dos Parâmetros da Compensação para Meia-Onda

Por simplicidade, tomando-se uma linha de transmissão ideal, o comprimento de onda de propagação resultante apresenta-se como uma função da frequência utilizada, da indutância e da capacitância dessa linha. A relação entre estas grandezas é bastante conhecida e pode ser expressa como:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f\sqrt{LC}} \qquad (5.1)$$

onde:

λ - comprimento de onda de propagação

v - velocidade de propagação

f - frequência de oscilação da onda

L e C - indutância e capacitância da linha, respectivamente.

Assim sendo, a equação anterior demonstra que, à frequência de 60 Hz e admitindo-se uma velocidade de 3×10^5 km/s, o comprimento de onda de propagação é igual a 5000 km.

Uma vez que, para uma dada distribuição dos condutores no espaço, os parâmetros L e C da linha de transmissão são fixos, e ainda a frequência de oscilação da onda transmitida é mantida constante, a variação do comprimento elétrico da linha, cujo com

primento real pode ser qualquer, só é possível através da compensação dos parâmetros L e C. Então, através da equação anterior é possível concluir que, se o comprimento físico de uma linha for inferior a $\lambda/2$, o comprimento de onda pode ser ajustado convenientemente através de um aumento dos parâmetros L e C. Por outro lado, se o comprimento real for superior a $\lambda/2$, o efeito desejado pode ser obtido através da diminuição dos mesmos parâmetros. Estudos anteriores [12,13] revelaram que a compensação simultânea de ambos os parâmetros é mais atrativa, sob o ponto de vista técnico, do que uma atuação isolada sobre os parâmetros L ou C da linha. Desta forma, o comprimento de linha a ser compensada pode ser calculado a partir da equação:

$$\Delta\ell_c = \frac{\theta_c - \theta}{\omega . \sqrt{LC}} \qquad (5.2)$$

Assim, na compensação das linhas para meia-onda, se tal compensação for implementada a partir de bancos em T, os parâmetros de compensação calculam-se a partir das expressões: [11]

$$\Delta x = x \; . \; \Delta\ell_c \qquad (5.3)$$

$$\dot{z} = j \frac{\Delta x}{n} \qquad (5.4)$$

$$\dot{y} = j \frac{1}{\frac{z_o^2}{z} - \frac{z}{4}} \qquad (5.5)$$

Por outro lado, se a mesma compensação for implementada a partir de bancos em Pi, os parâmetros de compensação calculam-se pelas equações:

$$\Delta b = b \cdot \Delta \ell_c \tag{5.6}$$

$$\dot{y}' = j \frac{\Delta b}{n} \tag{5.7}$$

$$\dot{z} = j \frac{1}{\frac{Y_o^2}{y'} - \frac{y'}{4}} \tag{5.8}$$

De outro modo, quando a compensação das linhas para meia-onda for implementada somente por bancos em derivação, os parâmetros dos bancos calculam-se a partir das seguintes equações:

$$\theta_c = \beta \cdot \ell = \omega \sqrt{LC_c} \cdot \ell \tag{5.9}$$

$$C_c = \frac{\theta_c^2}{(\omega \ell)^2 . L} \tag{5.10}$$

$$\Delta b = \omega \, (C_c - C) \cdot \ell \tag{5.11}$$

$$\dot{y}'' = j \frac{\Delta b}{n} \qquad (5.12)$$

Nas equações anteriores:

θ - ângulo da linha não compensada

θ_c - ângulo da linha compensada

$\Delta \ell_c$ - variação do comprimento da linha necessária à compensação

x - reatância longitudinal da linha

Δx - variação da reatância longitudinal necessária à compensação

$\dot{z}$ - reatância longitudinal total de cada banco em T de compensação

$\dot{y}$ - susceptância transversal total de cada banco em T da compensação

b - susceptância transversal da linha

Δb - variação da susceptância transversal necessária á compensação

$\dot{y}'$ - susceptância transversal total de cada banco com Pi de compensação

$\dot{z}'$ - reatância longitudinal total de cada banco em Pi de compensação

$\dot{y}''$ - susceptância total de cada banco em derivação

ω - frequência de oscilação

β - constante de fase da linha

ℓ - comprimento da linha

n - número de bancos utilizados para a compensação

L e C - indutância e capacitância da linha, respectivamente

Z_o e Y_o - impedância e admitância natural da linha de transmissão.

A equação 5.2, bem como a equação 5.11, revelam a consistência da presente metodologia de cálculo na definição da natureza dos parâmetros de compensação para meia-onda. Assim, na equação 5.2, para um θ menor que θ_c, o que significa $\ell < \lambda/2$, o sinal positivo resultante na variação do comprimento necessário á compensação representa, na verdade, um acréscimo no comprimento elétrico da linha real. Em contrapartida, se θ for maior que θ_c, o que corresponde a $\ell > \lambda/2$, o sinal negativo na variação do comprimento necessário á compensação representa uma diminuição no comprimento elétrico da linha no sentido de torná-lo igual ao meio comprimento de onda. Portanto, o sinal resultante na variação do comprimento necessário à compensação refletir-se-á na natureza dos parâmetros de compensação, o que se demonstra coerente com a discussão empreendida no capítulo anterior. Um raciocínio análogo ao anterior pode ser feito sobre a equação 5.11 e que, por sua vez, define a natureza do banco de compensação em derivação.

5.2.2- AS TENSÕES E AS CORRENTES NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM MEIA-ONDA

Nas linhas de transmissão em meia-onda, compensadas ou não, as tensões e as correntes ao longo das mesmas apresentam, em regime permanente, comportamentos peculiares. Tais grandezas são influenciadas pelo valor e pela natureza da carga no terminal receptor dessas linhas. Assim, as figuras 5.1 e 5.2 apresentam os perfis das tensões e correntes, respectivamente, para a fase-A da linha de comprimento igual a $\lambda/2$ km, para valores de potência na recepção iguais a 0, 0,5 P_c, P_c e 1,5 P_c, mantidas as tensões na emissão equilibradas e iguais, em módulo, a 1 pu.

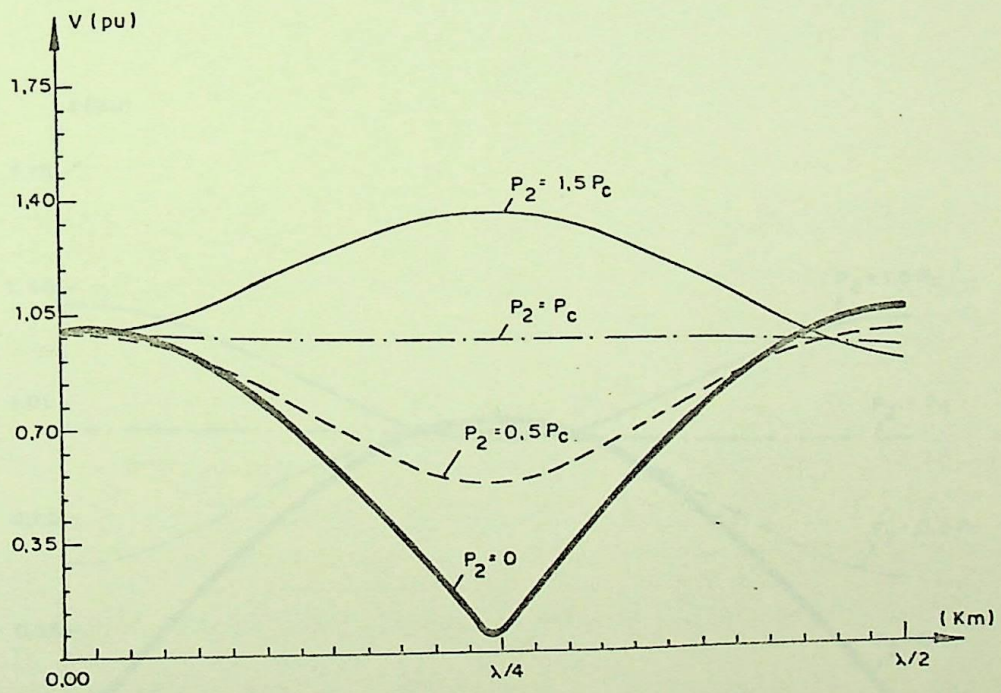


FIGURA 5.1 - PERFIS DE TENSÕES NA FASE-A DA LINHA PARA $P_2 = 0$, $0,5\,P_c$, P_c E $1,5\,P_c$.

Nota-se que, na figura acima, embora as tensões terminais permaneçam em valores aceitáveis, próximos a 1 pu, tal já

não ocorre ao longo da linha. Esta variação de tensão invibializa a alimentação de cargas intermediárias, o que significa que a transmissão em meia-onda só pode, em princípio, ser utilizada numa transmissão de energia ponto a ponto, além do que, o carregamento da linha para além da potência característica provoca sobre-elevações de tensão inadmissíveis.

Ao contrário das tensões, os perfis de correntes mostrados na figura 5.2, a seguir, permitem concluir que, a despeito da variação da carga no terminal receptor, as correntes na região central da linha permanecem praticamente constantes e iguais a 1 pu.

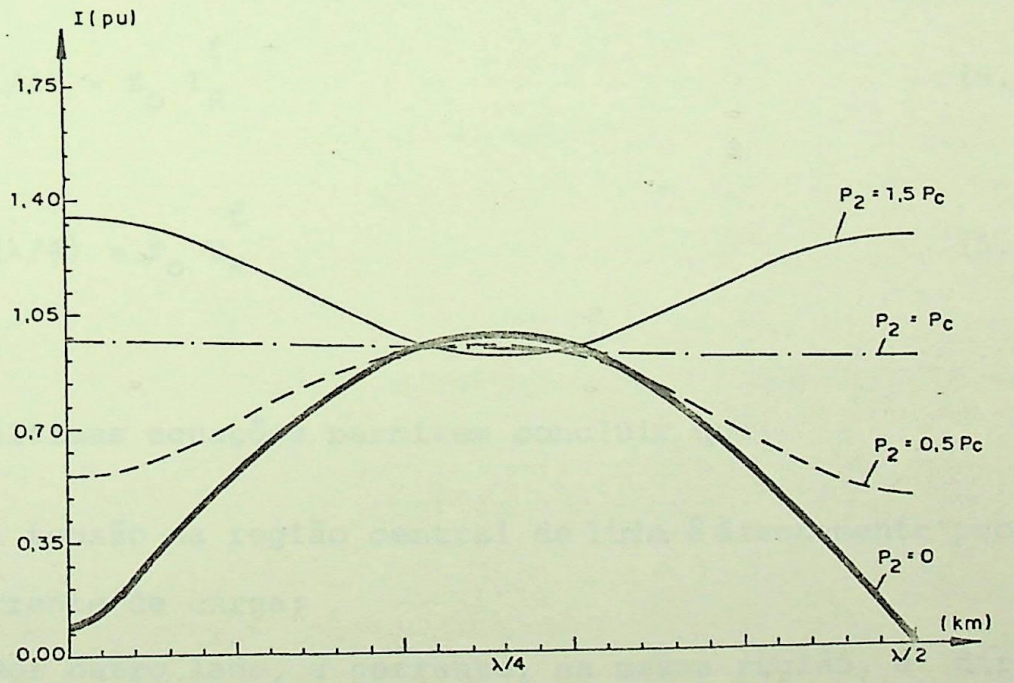


FIGURA 5.2 - PERFIS DE CORRENTES NA FASE-A DA LINHA PARA $P_2=0$, $0{,}5\ P_C$, P_C E $1{,}5\ P_C$.

Estes resultados são facilmente justificáveis. De fato, no caso de uma linha ideal, sem perdas, as equações 3.45 e 3.46, transformam-se em:

$$\overset{.f}{V}(x) = \cos(\beta x) \cdot \overset{.f}{V_R} + \operatorname{sen}(\beta x) \cdot Z_o \overset{.f}{I_R} \qquad (5.13)$$

$$\overset{.f}{I}(x) = y_o \operatorname{sen}(\beta x) \cdot \overset{.f}{V_R} + \cos(\beta x) \cdot \overset{.f}{I_R} \qquad (5.14)$$

Então, fazendo $x = \lambda/4$, as equações anteriores conduzem às expressões:

$$\overset{f}{V}(\lambda/4) = Z_o \overset{f}{I_R} \qquad (5.15)$$

$$\overset{f}{I}(\lambda/4) = Y_o \overset{f}{V_R} \qquad (5.16)$$

Estas duas últimas equações permitem concluir que:

- a tensão na região central da linha é diretamente proporcional à corrente de carga;

- Por outro lado, a corrente, na mesma região, é diretamente proporcional à tensão no terminal receptor que, por sua vez pouco se altera face à variação da carga no mesmo terminal da linha.

Por outro lado, a Fig.5.3 abaixo mostra a influência do fator de potência da carga sobre os perfis de tensão ao longo da linha. A carga, em módulo, foi tomada igual à potência característica da referida linha.

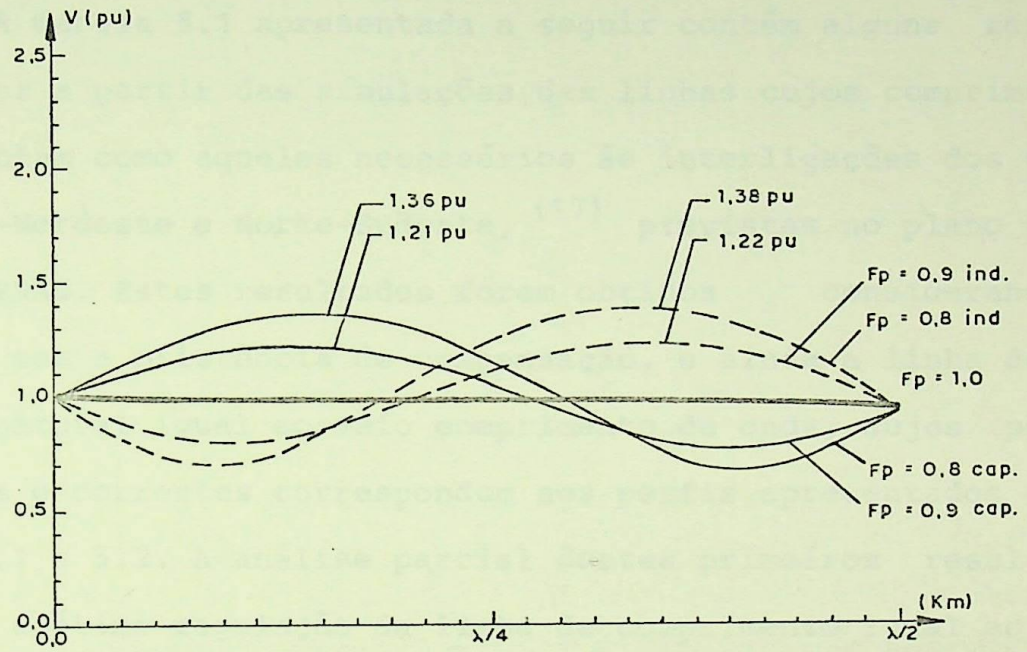


FIGURA 5.3 - PERFIS DE TENSÕES (SEQUÊNCIA POSITIVA) AO LONGO DA LINHA PARA DIFERENTES VALORES DE DE FATOR DE POTÊNCIA (FP = 1,0 ; 0,9 E 0,8 IND. E CAP.) DA CARGA ($P_2=P_C$).

A análise da figura acima mostra o aparecimento de sobretensões inadimissíveis, na região correspondente ao primeiro quarto do comprimento da linha, quando o fator de potência da carga é capacitivo. De forma semelhante à anterior, sobre-elevações de tensões surgem na região correspondente ao terceiro quarto do comprimen

to da linha, por ocasião da natureza indutiva da carga. Nota-se ainda que tais sobretensões são cada vez maiores à medida que o fator de potência da carga se afasta da unidade.

5.2.3- Análise de Alguns Resultados Relevantes

A tabela 5.1 apresentada a seguir contém alguns resultados obtidos a partir das simulações das linhas cujos comprimentos se apresentam como aqueles necessários às interligações dos sistemas Norte-Nordeste e Norte-Sudeste, [17] previstas no plano 2010 da ELETROBRÁS. Estes resultados foram obtidos considerando-se as linhas sem a existência de compensação, e ainda a linha de comprimento natural igual ao meio comprimento de onda, cujos perfis de tensões e correntes correspondem aos perfis apresentados nas figuras 5.1 e 5.2. A análise parcial destes primeiros resultados demonstra a ótima regulação da linha de comprimento igual ao meio comprimento de onda, seguida de perto pela linha de comprimento igual a 2700 km face a variação da carga no terminal receptor. Tal fato revela ainda que a linha de 2700 km requer, em princípio, para a sua transformação em linha de meio comprimento de onda, um grau de compensação bastante baixo. Por outro lado, na linha de comprimento igual a 2000 km os valores de tensão resultantes no terminal receptor (a vazio, aparece 1,22 pu na fase central da linha), tornam indispensável a compensação da linha.

TABELA 5.1 - RESULTADOS OBTIDOS PARA LINHAS COM COMPRIMENTOS IGUAL OU PRÓXIMOS AO COMPRIMENTO NATURAL EM MEIA-ONDA ($\lambda/2$)

V_{BASE} = 750kV S_{BASE} = 2138 MVA (SIL)			$P_2 = 0$		$P_2 = 0{,}5\ P_c$			$P_2 = P_c$			$P_2 = 1{,}5\ P_c$		
			$\dot{V}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$
ℓ(Km)	FASES		LINHAS NÃO-COMPENSADAS										
2000	pu	a	1.17 -177,6°	.61 -73,5°	1.07 -161,5°	.52 -154,7°	.77 -22,3°	.93 -148,9°	.89 -142,1°	.97 6.5°	.78 -139,7°	1.15 -132,9°	1.13 23,7°
		b	1.22 62,5°	.76 157,8°	1,12 81,2°	.59 82,4°	.88 -150,3°	.96 95,6°	1.02 96,8°	1.07 -118,3°	.81 105,8°	1.29 107,0°	1.21 -98,8°
		c	1.17 -58,6°	.62 31,2°	1.08 -41,3°	.53 -45,5°	.77 -84,1°	.95 -27,1°	.93 -31,3°	.96 115,9°	.81 -16,5°	1.18 -20,7°	1.12 137,3°
2437 $\lambda/2$	pu	a	1.03 179,4°	.09 20,2°	.95 178,8°	.46 -174,4°	.55 7,3°	.91 178,8°	.88 -174,4°	.96 6,4°	.86 178,8°	1.26 -174,4°	1.34 6,1°
		b	.99 62,1°	.09 -170,4°	.97 62,6°	.52 63,8°	.58 -123,1°	.95 63,6°	1.01 64,8°	1.07 -119,0°	.92 64,6°	1.46 65,8°	1.53 -116.8°
		c	.97 -61,3°	.01 104,7°	.96 -59,8°	.46 -64,0°	.52 115,1°	.95 -59,4°	.92 -63,6°	.97 116,1°	.93 -59,1°	1.36 -63,3°	1.41 116,5°
2700	pu	a	1.09 174,8°	.39 75,3°	.98 166,9°	.48 173,7°	.65 26,8°	.89 159,3°	.87 166,1°	.96 6,7°	.81 153,0°	1.17 159,8°	1.23 -5,1°
		b	1.07 62,3°	.31 -39,1°	1.01 52,0°	.54 53,2°	.65 -100,6°	.94 44,4°	1.00 45,6°	1.07 -119,3°	.87 38,1°	1.39 39,3°	1.43 -129,9°
		c	.98 -61,2°	.31 -166,5°	.99 -70,3°	.48 -74,5°	.61 137,5°	.94 -78,9°	.92 -83,1°	.97 115,9°	.87 -86,3°	1.27 -90,5°	1.29 103,1°

Assim sendo, as tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam, em seguida, os resultados obtidos a partir da compensação das linhas de 2000 km e 2700 km para o regime de meia-onda. Tais tabelas de resultados foram elaboradas a partir das simulações das linhas compensadas para meia-onda que utilizam bancos em T, em Pi e bancos em derivação, respectivamente, considerando ainda um banco em cada extremidade da linha.

Os resultados constantes nas tabelas 5.2 e 5.3, para os bancos em T e em Pi, respectivamente, apontam praticamente para os mesmos resultados, os quais se apresentam plenamente satisfatórios uma vez que os valores de tensão no terminal receptor resultam próximos a 1 pu, independentemente do valor da carga no mesmo terminal. Por sua vez, os valores de correntes no terminal emissor apresentam-se bem próximos àqueles verificados, sob as mesmas condições, para a linha de comprimento natural apresentada na Tabela 5.1.

Por outro lado, os resultados constantes na tabela 5.4, correspondentes à compensação utilizando bancos em derivação, mostram-se inadequados, o que inviabiliza, em princípio, a compensação em derivação por apenas dois bancos, um em cada terminal da linha.

De um modo geral, as tabelas referidas acima apresentam as tensões e as correntes naturalmente desequilíbradas nas três fases da linha. Tal fato decorre das linhas simuladas não utilizarem transposições de condutores.

TABELA 5.2 - RESULTADOS OBTIDOS PARA LINHAS COMPENSADAS PARA MEIA-ONDA POR BANCOS EM T

V_{BASE}=750 kV S_{BASE}=2138MVA (SIL)			$P_2 = 0$		$P_2 = 0,5\ P_c$			$P_2 = P_c$			$P_2 = 1,5\ P_c$		
			$\dot{V}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$
ℓ(Km)	FASES		LINHAS COMPENSADAS PARA MEIA-ONDA: BANCOS EM T										
2000 θ_c=190°	pu	a	1.02	.28	1.01	.48	.68	.99	.96	1.13	.97	1.41	1.56
			178,7°	60,9°	173,9°	-179,3°	21,0°	169,7°	176,5°	8,8°	165,8°	172,6°	1,4°
		b	1.01	.14	1.00	.53	.61	.97	1.04	1.10	.94	1.51	1.56
			60,0°	-59,3°	54,9°	56,1°	-112,0°	50,0°	51,2°	-122,1°	45,4°	46,4°	-128,7°
		c	1.01	.22	.96	.46	.49	.92	.89	.88	.87	1.28	1.26
			-60,4°	-152,1°	-63,7°	-67,9°	137,4°	-67,0°	-71,3°	122,1°	-70,1°	-74,4°	114,8°
2700 θ_c=190°	pu	a	1.06	.23	.95	.46	.56	.88	.86	.93	.82	1.18	1.25
			177,1°	69,6°	172,5°	179,3°	18,7°	168,4°	175,2°	6,5°	164,8°	171,6°	-.3°
		b	1.01	.14	.97	.52	.59	.94	1.00	1.06	.89	1.44	1.49
			63,2°	-50,0°	57,8°	59,0°	-109,2°	54,5°	55,7°	-117,8°	51,8°	53,0°	-122,5°
		c	.96	.16	.96	.47	.56	.94	.92	.99	.91	1.34	1.40
			-62,2°	175,2°	-65,4°	-69,7°	127,0°	-69,9°	-74,1°	115,4°	-74,1°	-78,4°	108,5°

TABELA 5.3 - RESULTADOS OBTIDOS PARA LINHAS COMPENSADAS PARA MEIA-ONDA POR BANCOS EM PI

V_{BASE}= 750 kV S_{BASE}=2138MVA (SIL)			$P_2 = 0$		$P_2 = 0,5\ P_c$			$P_2 = P_c$			$P_2 = 1,5\ P_c$		
			$\dot{V}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$
ℓ (Km)	FASES		LINHAS COMPENSADAS PARA MEIA-ONDA: BANCOS EM Pi										
2000 θ_c=190°	pu	a	1.02	.25	1.01	.49	.67	.98	.96	1.11	.96	1.39	1.53
			178,5°	56,2°	172,1°	178,9°	16,0°	166,3°	173,1°	3,4°	160,9°	167,7°	-4,8°
		b	1.01	.10	.99	.53	.59	.96	1.03	1.08	.92	1.46	1.52
			59,9°	-70,7°	53,0°	54,2°	-117,7°	46,5°	47,7°	-127,7°	40,5°	41,7°	-135,0°
		c	1.01	.18	.96	.47	.47	.91	.88	.87	.86	1.26	1.23
			-60,3°	-152,5°	-65,2°	-69,4°	131,2°	-69,9°	-74,1°	116,6°	-74,2°	-78,4°	108,9°
2700 θ_c= 190°	pu	a	1.06	.23	.95	.46	.56	.88	.85	.93	.82	1.19	1.25
			177,1°	69,6°	172,6°	179,4°	18,7°	168,5°	175,3°	6,5°	164,9°	171,7°	-.2°
		b	1.01	.13	.97	.52	.59	.94	1.00	1.06	.89	1.44	1.49
			63,2°	-50,1°	57,9°	59,1°	-109,2°	54,7°	55,8°	-117,8°	52,0°	53,2°	-122,4°
		c	.96	.16	.96	.47	.56	.94	.92	.99	.92	1.34	1.40
			-62,2°	175,0°	-65,4°	-69,6°	127,0°	-69,8°	-74,0°	115,5°	-74,0°	-78,2°	108,6°

TABELA 5.4 - RESULTADOS OBTIDOS PARA LINHAS COMPENSADAS PARA MEIA-ONDA POR BANCOS EM DERIVAÇÃO

V_{BASE} = 750 kV S_{BASE} = 2138 MVA (SIL)			$P_2 = 0$		$P_2 = 0,5\ P_c$			$P_2 = P_c$			$P_2 = 1,5\ P_c$		
			$\dot{V}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$	$\dot{V}_2$	$\dot{I}_2$	$\dot{I}_1$
ℓ (Km)	FASES		LINHAS COMPENSADAS PARA MEIA-ONDA: BANCOS EM DERIVAÇÃO										
2000 θ_c=190°	pu	a	.76 -178,9°	.02 83,4°	.72 -168,4°	.35 -161,6°	.16 71,3°	.67 -158,9°	.65 -152,1°	.37 66,2°	.61 -150,9°	.88 -114,1°	.56 65,1°
		b	.78 60,7°	.90 -33,9°	.76 73,2°	.41 74,4°	1.05 -50,6°	.71 84,3°	.75 85,5°	1.31 -57,1°	.64 93,5°	1.02 94,6°	1.55 -57,8°
		c	.75 -61,8°	.98 -151,2°	.73 -49,7°	.36 -54,0°	1.04 -166,1°	.68 -38,9°	.67 -43,1°	1.22 -174,7°	.63 -29,6°	.92 -33,9°	1.42 -177,3°
2700 θ_c=190°	pu	a	1.06 178,1°	.09 39,3°	.95 168,8°	.46 175,6°	.53 .4°	.86 161,3°	.84 168,1°	.89 -9,1°	.78 155,0°	1.14 161,8°	1.19 -16,1°
		b	.98 63,6°	.06 -152,5°	.96 53,2°	.51 54,4°	.57 -128,3°	.91 45,8°	.97 47,0°	1.03 -134,3°	.85 39,5°	1.35 40,7°	1.42 -140,1°
		c	.95 -63,0°	.09 110,8°	.94 -69,9°	.46 -74,1°	.54 107,3°	.89 -77,9°	.87 -82,1°	.95 99,3°	.84 -85,0°	1.22 -89,2°	1.30 92,1°

Os resultados analisados anteriormente, referentes às linhas de 2000 km e 2700 km, compensadas para meia-onda, foram obtidos a partir da utilização de um banco em cada extremidade da linha que, por sua vez, foram dimensionados para fornecer, em cada caso, à tensão nominal e à corrente correspondente à potência característica, potências reativas, por fase, iguais aos valores resumidos na tabela abaixo:

TABELA 5.5 - POTÊNCIAS REATIVAS DE COMPENSAÇÃO
MVAR/(FASE.BANCO)

COMPRIMENTO DA LINHA (Km)	TIPO DE COMPENSAÇÃO				
	BANCOS EM T		BANCOS EM Pi		EM DERIVAÇÃO
	SÉRIE	SHUNT	SÉRIE	SHUNT	
2000 ($\theta_c = 190^o$)	265 (ind.)	270 (cap.)	277 (ind.)	263 (cap.)	600 (cap.)
2700 ($\theta_c = 190^o$)	58 (cap.)	57 (ind.)	59 (cap.)	58 (ind.)	113 (ind.)

Uma análise comparativa entre os valores das potências reativas de compensação mostra que as potências reativas necessárias para compôr o banco em T ou o banco em Pi, são praticamente iguais, enquanto que a compensação somente por bancos em derivação exige uma potência cerca de 12% superior. Tal fato pode se constituir em mais uma desvantagem da utilização de bancos em derivação para compensar as linhas para meia-onda.

A figura 5.4, a seguir, mostra os perfis das tensões, correspondentes à fase-A da linha de 2000km compensada, para os mesmos valores de potência no terminal receptor constantes na tabela 5.2. Nesta figura nota-se que, além das características descritas acerca do comportamento das tensões ao longo das linhas de meia-onda face à variação da carga, ocorrem quedas de tensão nos parâmetros série dos bancos de compensação em T.

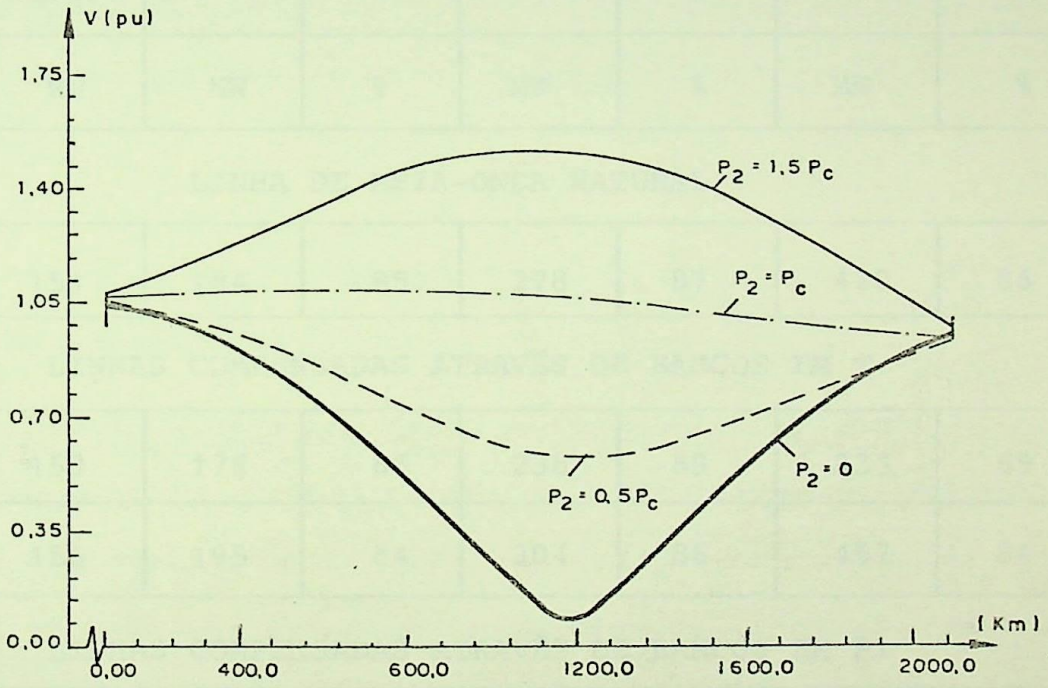


FIGURA 5.4 - PERFIS DAS TENSÕES NA FASE-A DA LINHA DE 2000 KM COMPENSADA PARA MEIA-ONDA QUANDO: $P_2 = 0$, $P_2 = 0{,}5\,P_c$, $P_2 = P_c$ E $P_2 = 1{,}5\,P_c$.

Outro estudo, não menos importante que o anterior, no sentido de atestar a viabilidade da transmissão de energia, corresponde à análise das perdas que ocorrem na transmissão em meia-onda.

A tabela 5.6, a seguir, apresenta os valores das perdas obtidas em algumas simulações realizadas.

TABELA 5.6 - PERDAS NAS LINHAS E RENDIMENTOS DA TRANSMISSÃO. ($P_C = 2138$ MW)

CARGA	$P_2 = 0$	$P_2 = 0{,}5\ P_C$		$P_2 = P_C$		$P_2 = 1{,}5\ P_C$	
ℓ	Perdas	Perdas	η	Perdas	η	Perdas	η
Km	MW	MW	%	MW	%	MW	%
LINHA DE MEIA-ONDA NATURAL							
2437 ($\lambda/2$)	151	184	85	278	87	420	86
LINHAS COMPENSADAS ATRAVÉS DE BANCOS EM T							
2000 ($\theta_c = 190^o$)	153	176	86	238	89	333	89
2700 ($\theta_c = 190^o$)	156	195	84	304	86	457	84
LINHAS COMPENSADAS ATRAVÉS DE BANCOS EM Pi							
2000 ($\theta_c = 190^o$)	150	173	86	234	89	322	89
2700 ($\theta_c = 190^o$)	156	195	84	303	86	458	84
LINHAS COMPENSADAS ATRAVÉS DE BANCOS EM DERIVAÇÃO							
2000 ($\theta_c = 190^o$)	142	150	79	170	86	193	86
2700 ($\theta_c = 190^o$)	156	191	84	283	85	404	84

Os valores das perdas apresentados na tabela acima fazem crer que, em vazio ou em regime de carga leve, a solicitação de

potência no terminal emissor da linha pode representar a capacidade de mais de uma unidade geradora, somente para suprir as perdas. No entanto, para este tipo de transmissão de energia, tais valores de perdas podem ser facilmente absorvidas por uma única máquina, a despeito de se poder adotar algumas medidas operativas capazes de melhorar o desempenho da linha de meia-onda nas condições ora descritas.

A tabela 5.6 mostra ainda que as linhas compensadas para meia-onda através de bancos em T ou em Pi apresentam, praticamente, os mesmos valores de perdas e, consequentemente, rendimentos semelhantes.

5.2.4- Utilização de Algumas Medidas Operativas para Melhorar o Desempenho das Linhas de Meia-Onda

Um dos problemas apontados no sub-ítem anterior refere-se às perdas que ocorrem na operação de linhas de meia-onda em vazio ou em regime de carga leve. Assim por uma questão de comodidade, a tabela 5.7, apresentada em seguida, contém apenas os valores das perdas, bem como dos rendimentos da transmissão, nas linhas de comprimento natural em meia-onda ou compensadas para tal através de bancos em T. Nestas circunstâncias, se for possível utilizar os geradores, bem como dispor de tapes de transformadores, de tal forma a permitir operar a linha com uma tensão, por exemplo, igual a 0,9 pu ou 0,8 pu, então, será possível melhorar o desempenho da mesma para as condições de carga em análise.

TABELA 5.7 - PERDAS NAS LINHAS E RENDIMENTOS DA TRANSMISSÃO ($P_C = 2138$ MW)

CARGA	ℓ (km) / V_1 (pu)	2437 ($\lambda/2$)		2000 ($\theta_c = 190^o$)		2700 ($\theta_c = 190^o$)	
		PERDAS (MW)	η%	PERDAS (MW)	η%	PERDAS (MW)	η%
$P_2 = 0$	0,9 pu	122 (19,2%)	-	124 (18,9%)	-	126 (19,2%)	-
	0,8 pu	96 (36,4%)	-	98 (36%)	-	100 (35,8%)	-
$P_2 = 0,5 P_C$	0,9 pu	163 (11,4%)	86	152 (13,6%)	87	175 (10,3%)	85
	0,8 pu	147 (20,1%)	87	132 (25%)	89	160 (17,9%)	86

Os valores entre parêntesis, observados nas colunas correspondentes as perdas, referem-se à redução percentual das mesmas face à forma proposta para a operação do sistema de transmissão num estágio inicial. A vazio, notam-se reduções da ordem de 19% e 36% para $V_1 = 0,9$ pu e $V_1 = 0,8$ pu, respectivamente. Da mesma forma, em carga, verificam-se facilmente resultados expressivos. A figura 5.5 a seguir mostra os perfis das tensões na linha de comprimento natural em meia-onda, quando se reduz a tensão de operação no terminal emissor para $V_1 = 0,9$ pu e $V_1 = 0,8$ pu. A carga no terminal receptor da linha é mantida constante e igual a $0,5\ P_C$.

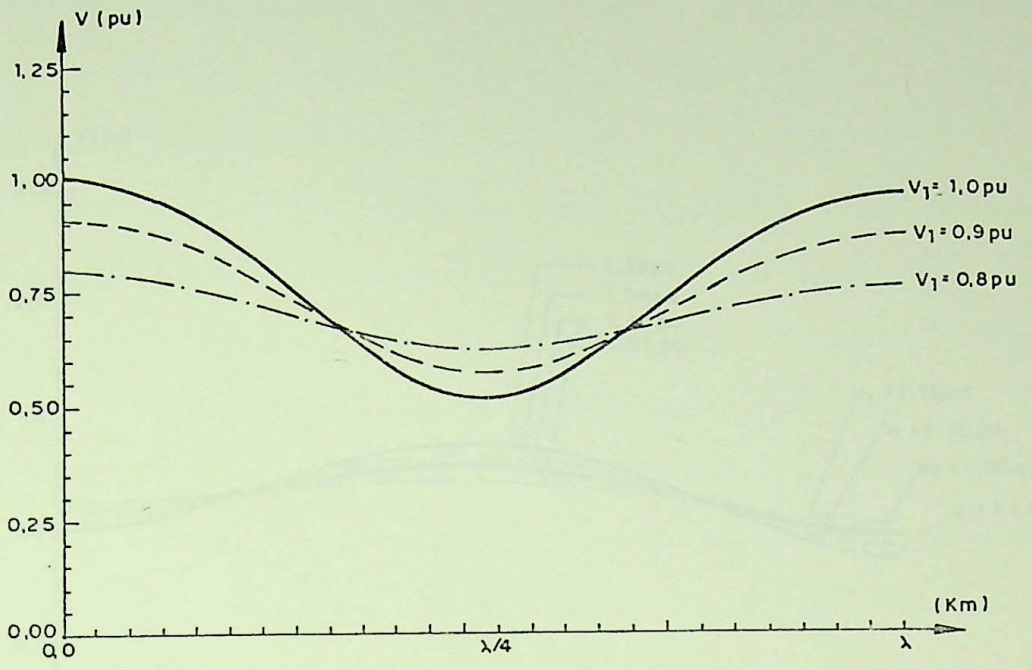


FIGURA 5,5 - PERFIS DE TENSÕES AO LONGO DA LINHA DE MEIA-ONDA PARA VALORES IGUAIS OU ABAIXO DA TENSÃO DE OPERAÇÃO DA LINHA, CONSIDERANDO-SE $P_2 = 0,5\ P_C$.

Por outro lado, também foi mostrado no sub-ítem anterior a ocorrência de sobretensões inadimissíveis na região central da linha, por ocasião do transporte de potências superiores à potência característica da mesma linha de comprimento natural em meia-onda ou compensada para tal. Então, se for possível utilizar os mesmos equipamentos, citados anteriormente, agora para fazer a tensão de operação da linha ser igual a 1,05 pu, 1,10 pu ou 1,15 pu, por exemplo, é de acreditar que tal procedimento reduza tais sobre-elevações de tensão a valores compatíveis com o isola

mento da linha. A figura 5.6 a seguir esclarece melhor o efeito desejado.

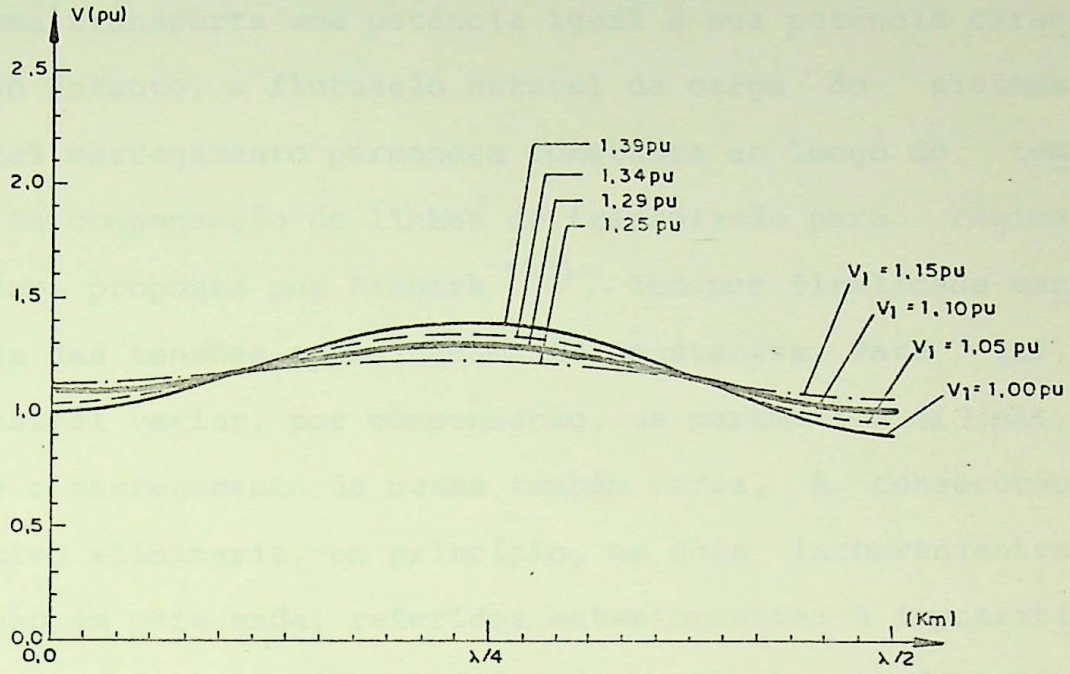


FIGURA 5.6 - PERFIS DE TENSÕES AO LONGO DA LINHA DE MEIA-ONDA PARA VALORES IGUAIS OU ACIMA DA TENSÃO DE OPERAÇÃO DA LINHA, CONSIDERANDO-SE $P_2 = 1,5\ P_C$.

A figura anterior mostra ainda os valores máximos que as tensões no meio da linha atingem face à adoção desta última medida operativa. Nota-se que uma variação de 15% acima da tensão nominal aplicada ao terminal emissor da linha, ocasiona uma redução de 10% na sobretensão resultante no meio da linha de meia-onda, quando a mesma transporta uma potência igual a 1,5 P_C (3200 MW).

5.3 - A Compensação para Potência Característica

Conforme foi mostrado nas figuras 5.1 a 5.3, o melhor perfil de tensões ao longo de uma linha de transmissão obtém-se quando a mesma transporta uma potência igual à sua potência característica. No entanto, a flutuação natural da carga do sistema impede que tal carregamento permaneça constante ao longo do tempo. A idéia da compensação de linhas de transmissão para regime característico, proposta por Kimbark [18], tem por finalidade manter os perfis das tensões aproximadamente constantes. Para tal, deve ser possível variar, por compensação, os parâmetros da linha, à medida que o carregamento da mesma também varia. A consecução de tal objetivo eliminaria, em princípio, os dois inconvenientes da compensação em meia-onda, referidos anteriormente: a impossibilidade de alimentar cargas intermediárias e o transporte de potências superiores à sua potência característica.

5.3.1- Cálculo dos Parâmetros da Compensação para Potência Característica

Novamente, pressupondo, por simplicidade, a linha sem perdas, a potência característica da mesma é calculada por:

$$P_C = V^2 \cdot \sqrt{b/x} \qquad (5.17)$$

onde:

V - é a tensão nominal da linha

b - é a susceptância transversal da linha

x - é a reatância longitudinal

A equação anterior mostra que, se fosse possível variar, de forma contínua, a susceptância transversal da linha, seria também possível controlar a potência característica correspondente. Assim sendo, a compensação para potência característica poderia ser implementada através de um sistema de controle que, ao detetar qualquer variação no carregamento da linha, comandaria a variação conveniente da susceptância, b, e consequentemente, a sua potência característica, P_c. Designando pelo índice c, as grandezas correspondentes à linha compensada, é possível então escrever:

$$\frac{P_{cc}}{P_c} = \sqrt{\frac{b_c}{b}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta b_c}{b}} \qquad (5.18)$$

Tomando P_{cc} igual à potência transportada pela linha, é então possível calcular a variação correspondente da susceptância de compensação, Δb_c que iguala a potência característica da linha compensada ao valor P_{cc} requerido. Então, da equação anterior, resulta:

$$\Delta b_c = \left[\left(\frac{P_{cc}}{P_c} \right)^2 - 1 \right] . b \qquad (5.19)$$

No entanto, a natureza do acréscimo de susceptância de compensação, resultante do cálculo através da equação 5.19, só ficaria bem caracterizada se fosse levada em conta a natureza da susceptância transversal da linha que é definida pelo comprimento da mesma.

Assim, a figura 5.7 mostra a variação relativa da susceptância de compensação ($\Delta bc/b$) em função do valor relativo da potência transmitida pela linha, (P_{cc}/P_c), do terminal emissor para o terminal receptor.

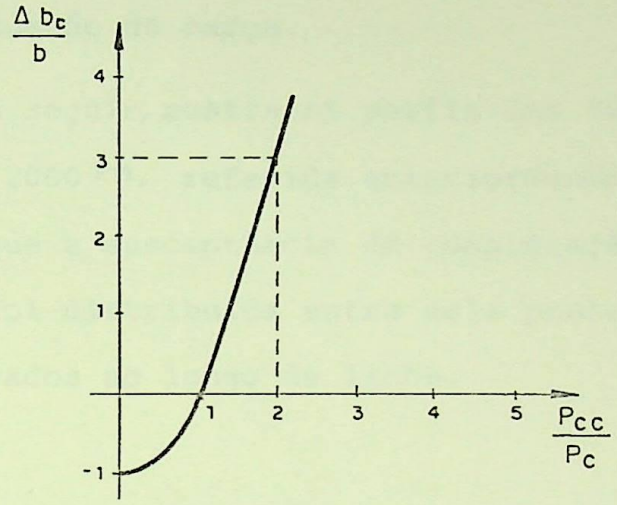


FIGURA 5.7 - VALORES DA POTÊNCIA DE COMPENSAÇÃO "SHUNT", SUPOSTA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA, EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA TRANSPORTADA, P_{CC}, PARA LINHAS COM $\ell < \lambda/2$.

A figura acima demonstra claramente que quando a potência transportada pela linha for inferior à sua potência característica, a compensação deve ser de natureza indutiva, ao passo que quando aquela potência for superior à potência característica da linha, a compensação deve ser de natureza capacitiva, considerando-se comprimentos de linhas inferiores a $\lambda/2$. Por outro lado, para comprimentos de linhas maiores que $\lambda/2$, a compensação deve ser de natureza capacitiva, se a potência transportada for infe

rior à potência característica. Caso contrário, a compensação deverá ser de natureza indutiva. A figura anterior mostra ainda que á medida que o carregamento da linha varia, a compensação deve responder, através da modificação automática dos seus parâmetros, de modo a "adaptar" a impedância característica "equivalente" da mesma à nova situação de carga.

A figura 5.8, a seguir, mostra os perfis das tensões nas três fases da linha de 2000 km, referida anteriormente, pressupondo a linha em vazio e que a susceptância de compensação, calculada pela equação 5.19, foi distribuída entre seis pontos de compensação, igualmente espaçados ao longo da linha.

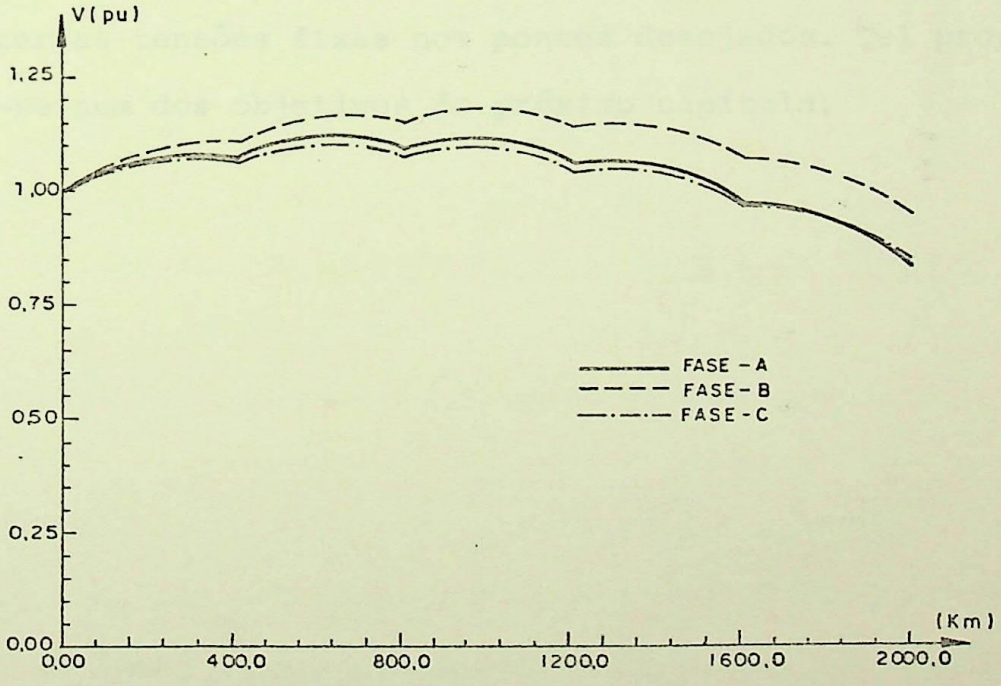


FIGURA 5.8 - PERFIS DAS TENSÕES NAS TRÊS FASES DA LINHA PARA $P_2 = 0$. COMPENSAÇÃO PARA POTÊNCIA CARACTERÍSTICA IMPLEMENTADA EM SEIS PONTOS EQUIDISTANTES.

A análise da figura anterior demonstra dois aspectos relevantes:

1. A despeito de um elevado número de pontos onde se efetua a compensação, as tensões resultantes nos pontos intermediários da linha, mesmo onde há compensação, estão acima dos valores desejáveis;

2. Os valores das tensões nas três fases aparecem naturalmente desequilíbrados. Observa-se ainda que o comportamento da fase central é diferente do comportamento das fases externas.

Então, tais aspectos sugerem a utilização de um controle capaz de manter as tensões fixas nos pontos desejados. Tal proposta constitui-se num dos objetivos do próximo capítulo.

5.4 - CONCLUSÕES

Uma certa predileção pela utilização de bancos em "T" para compensar as linhas para meia-onda é facilmente observada na literatura disponível. Tal fato é justificado, em princípio, pela possibilidade de se utilizar a reatância de dispersão dos transformadores, em cada extremidade da linha, como parte integrante dos elementos série dos referidos bancos de compensação, o que se constitui, portanto, numa vantagem. No entanto, os resultados apresentados ao longo deste capítulo demonstram que a utilização de bancos em "Pi" apontam para os mesmos valores obtidos com os bancos em "T". Somente os estudos específicos de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos, curto-circuito, ou mesmo de natureza econômica, poderão apontar para esta ou aquela alternativa.

Quanto às perdas que ocorrem nas linhas de meia-onda em vazio ou em carga leve, podem ser bastante minimizadas através da adoção de medidas operativas que, nas condições de carga descritas, operam os geradores e transformadores abaixo da condição nominal de tensão. Por outro lado, a operacionalização das linhas de meia-onda na faixa de potências transmitidas acima da potência característica, pode ser viabilizada através de outras medidas operativas que, por sua vez, fazem com que a tensão no barramento emissor da linha seja ajustada acima da tensão nominal. Na realidade, ainda que numa faixa restrita, a análise das figuras 5.5 e 5.6, obtidas a partir das medidas operativas mencionadas, sugerem a compensação da linha para potência característica, por uma variação na tensão de operação do sistema de transmissão.

De um modo geral, em regime permanente, as linhas de comprimento natural em meia-onda, ou compensadas para tal, apresentam comportamentos bem definidos. Não obstante as dificuldades mencionadas acima não parecerem intransponíveis, uma outra se apresenta mais séria: a alimentação de cargas intermediárias. Em princípio, tal limitação significa que a linha de meia-onda só pode ser utilizada num tipo de transmissão de energia ponto a ponto. Assim sendo, a proposta de Kimbark [18] parece contornar este problema, ou seja, compensar as linhas para potência característica, só que agora, por uma variação contínua dos parâmetros de compensação, simultaneamente à variação da carga no terminal receptor da linha. Os resultados obtidos para este tipo de compensação, decorrentes de uma formulação matemática que não contempla a ação do controle de tensões, apresentam-se pouco satisfatórios. Então, um modelo mais detalhado desse controle se constituirá num dos objetivos do próximo capítulo.

De realçar que o Anexo IV descreve, além das configurações utilizadas neste capítulo, para simular as linhas compensadas para meia-onda e para potência característica, outras configurações passíveis de serem resolvidas com os programas desenvolvidos.

CAPITULO 6

COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

CAPITULO 6

COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

6.1 - INTRODUÇÃO

Um sistema de compensação capaz de resolver os inconvenientes da compensação para meia-onda, tais como a impossibilidade de alimentação de cargas intermediárias e a quase inviabilidade de transmitir potências superiores a potência característica da linha, discutidas no capítulo anterior, será apresentado ao longo deste capítulo. O sistema de compensação referido é o que se encontra descrito na referência (19) e utiliza compensadores estáticos para realizar a compensação.

6.2 - A DESCRIÇÃO DO MODELO E DO EQUACIONAMENTO UTILIZADOS

O sistema de compensação supra mencionado é o que está mostrado na figura 6.1.

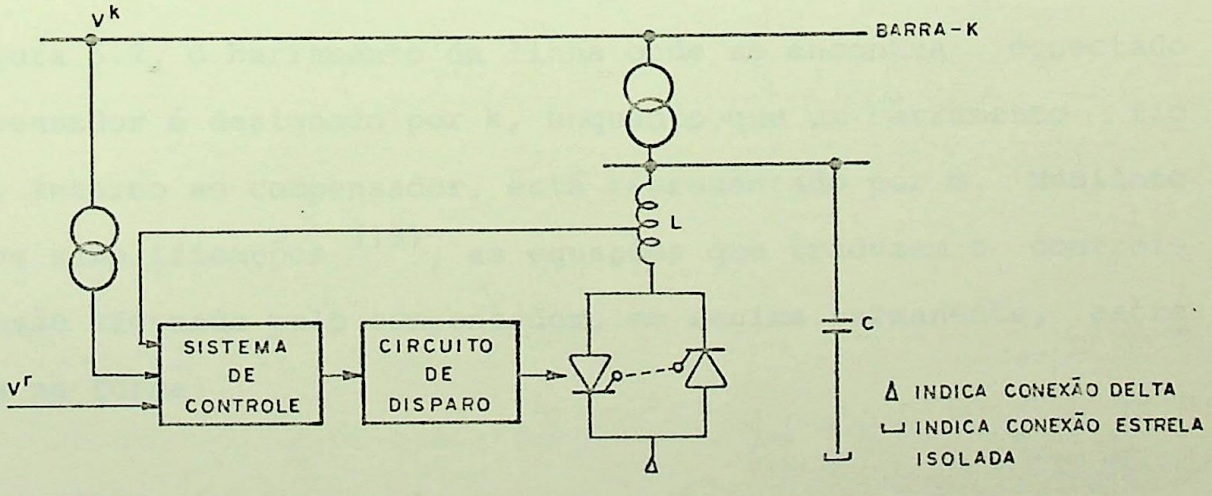


FIGURA 6.1 - SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

Para calcular as tensões e as correntes na linha de transmissão compensada, recorreu-se à implementação de um fluxo de carga trifásico[20-21], onde os reatores do compensador estático, controlados por tiristores, foram representados pelo modelo descrito na figura abaixo:

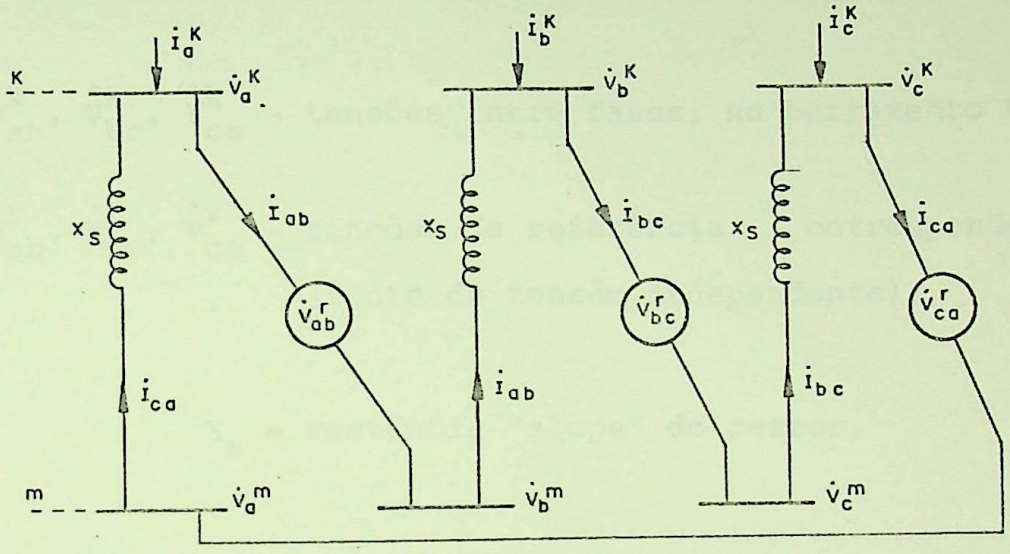


FIGURA 6.2 - MODELO DO COMPENSADOR UTILIZADO NO FLUXO DE POTÊNCIA.

Na figura 6.2, o barramento da linha onde se encontra conectado o compensador é designado por k, enquanto que um barramento fictício, interno ao compensador, está representado por m. Mediante algumas simplificações [19], as equações que traduzem o controle de tensão efetuado pelo compensador, em regime permanente, escrevem-se na forma:

$$\dot{V}_{ab}^k = \dot{V}_{ab}^r + j X_s \dot{I}_{ab} \qquad (6.1)$$

$$\dot{V}^k_{bc} = \dot{V}^r_{bc} + j X_s \dot{I}_{bc} \qquad (6.2)$$

$$\dot{V}^k_{ca} = \dot{V}^r_{ca} + j X_s \dot{I}_{ca} \qquad (6.3)$$

onde

$\dot{V}^k_{ab}$, $\dot{V}^k_{bc}$, $\dot{V}^k_{ca}$ - tensões entre fases, no barramento k;

$\dot{V}^r_{ab}$, $\dot{V}^r_{bc}$, $\dot{V}^r_{ca}$ - tensões de referência correspondentes (fonte de tensão independente);

X_s - reatância "slope" do reator.

Na verdade, as equações anteriores traduzem, em cada fase, a característica do reator mostrada na figura 6.3 a seguir:

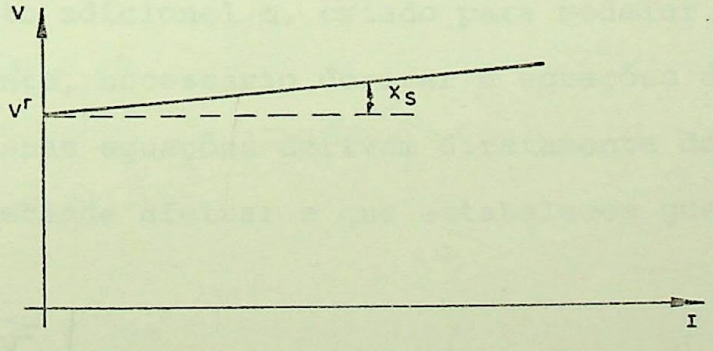


FIGURA 6.3 - A CARACTERÍSTICA V-I DO REATOR CONTROLADO POR TIRISTORES.

Então, ao formular o fluxo de potência trifásico, as reatâncias, X_s, dos reatores bem como as susceptâncias, B_c, dos capacitores, são incorporados diretamente à matriz de admitâncias nodais do sistema[22,24], cuja formação é apresentada no Anexo - I. Por outro lado, a contribuição das fontes correspondentes às tensões de referência é contabilizada nas equações de balanço de potência nos nós. Assim, as equações do balanço de potência do barramento k da linha podem ser escritas como:

$$\dot{S}_a^k = \dot{S}_{a,rede}^k - \dot{V}_a^k \cdot \dot{I}_{ab}^* \tag{6.4}$$

$$\dot{S}_b^k = \dot{S}_{b,rede}^k - \dot{V}_b^k \cdot \dot{I}_{bc}^* \tag{6.5}$$

$$\dot{S}_c^k = \dot{S}_{c,rede}^k - \dot{V}_c^k \cdot \dot{I}_{ca}^* \tag{6.6}$$

No entanto, a solução do fluxo de potência trifásico deve fornecer também os valores das tensões, em módulo e fase, nas três fases do barramento adicional m, criado para modelar o controle. Torna-se, portanto, necessário derivar 6 equações de balanço adicionais. Três dessas equações derivam diretamente do controle de tensão que se pretende efetuar e que estabelecem que:

$$|\dot{V}_a^k - \dot{V}_b^m| = |\dot{V}_{ab}^r| \tag{6.7}$$

$$|\dot{V}_b^k - \dot{V}_c^m| = |\dot{V}_{bc}^r| \tag{6.8}$$

$$|\dot{V}_c^k - \dot{V}_a^m| = |\dot{V}_{ca}^r| \tag{6.9}$$

As três outras equações de balanço estabelecem, por sua vez, a inexistência de perdas ativas nas fontes das tensões de referência. Portanto, essas três equações podem ser escritas na forma:

$$Re(\dot{V}^{r}_{ab} \cdot \dot{I}^{*}_{ab}) = 0 \qquad (6.10)$$

$$Re(\dot{V}^{r}_{bc} \cdot \dot{I}^{*}_{bc}) = 0 \qquad (6.11)$$

$$Re(\dot{V}^{r}_{ca} \cdot \dot{I}^{*}_{ca}) = 0 \qquad (6.12)$$

Assim sendo, a solução do fluxo de potência trifásico com a inclusão do modelo do compensador estático é obtida, iterativamente, através da bem conhecida expressão:

$$\underline{X}^{p} = \underline{X}^{p-1} - \underline{\underline{J}}^{-1}(x)^{p-1} \cdot \underline{f}(x)^{p-1} \qquad (6.13)$$

Na equação anterior, definem-se:

$\underline{X}^{t} = \underline{X}^{t}_{N}, \underline{X}^{t}_{C}$ → vetor das variáveis da rede e do compensador (tensões nos barramentos k e m a serem conhecidas);

$\underline{f}^{t}(x) = \underline{f}^{t}_{N}(x), \underline{f}^{t}_{C}(x)$ → vetor das funções residuais descritas pelas equações 6.4 a 6.12;

e p representa um contador de iterações. Já a matriz Jacobiano, $\underline{\underline{J}}(x)$, expandida, resulta:

$$\underline{\underline{J}}(x) = \begin{array}{|c|c|} \hline \underline{\underline{J}}_N(x) & \underline{\underline{J}}_{NC}(x) \\ \hline \underline{\underline{J}}_{CN}(x) & \underline{\underline{J}}_C(x) \\ \hline \end{array} \qquad (6.14)$$

onde as partições matriciais, $\underline{\underline{J}}_N(x)$, $\underline{\underline{J}}_{NC}(x)$, $\underline{\underline{J}}_{CN}(x)$ e $\underline{\underline{J}}_C(x)$ são determinadas a partir das derivadas parciais das funções residuais em relação às variáveis do sistema compensado. O Anexo II descreve, detalhadamente, o cálculo dos elementos destas matrizes.

6.3 - Análise de Alguns Resultados Relevantes

Os resultados analisados neste sub-ítem foram obtidos utilizando a linha de 2000 km não transposta, já referida no capítulo 5, compensada em três pontos através de compensadores estáticos, conforme demonstra a figura 6.4:

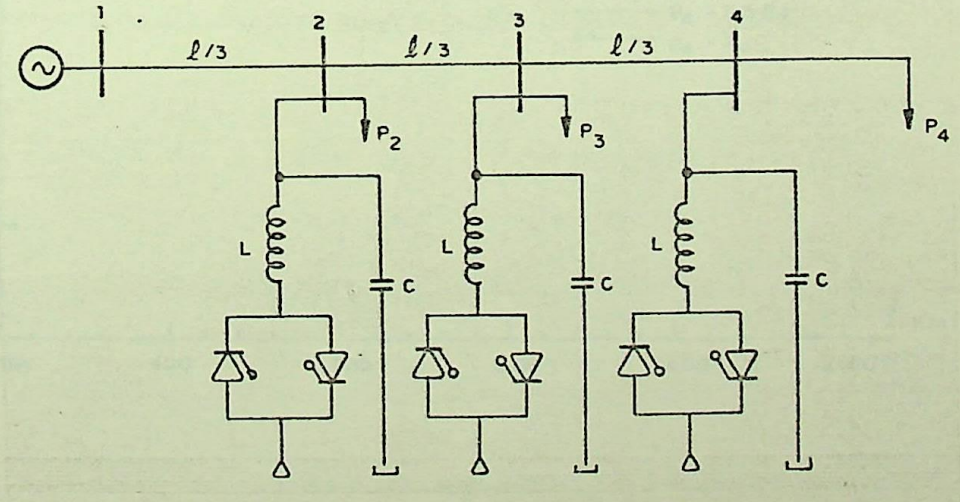


FIGURA 6.4 - Esquema do Sistema de Transmissão em Análise

Utilizando-se o esquema de transmissão mostrado na figura anterior, os perfis de tensão resultantes na fase-A, mostrados na figura 6.5, se comparados àqueles apresentados na figura 5.3, possibilita concluir que o controle introduzido através dos compensadores estáticos consegue manter o valor da tensão, nos pontos desejados ao longo da linha, em valores pré-fixados para diferentes carregamentos da mesma. Portanto, torna-se possível concluir que, além dos perfis correspondentes aos diversos carregamentos se aproximarem daquele que corresponde ao carregamento com potência característica, o que está de acordo com a filosofia de compensação proposta por Kimbark[18], é agora viável prover a alimentação de cargas intermediárias junto aos pontos onde se localizam os compensadores.

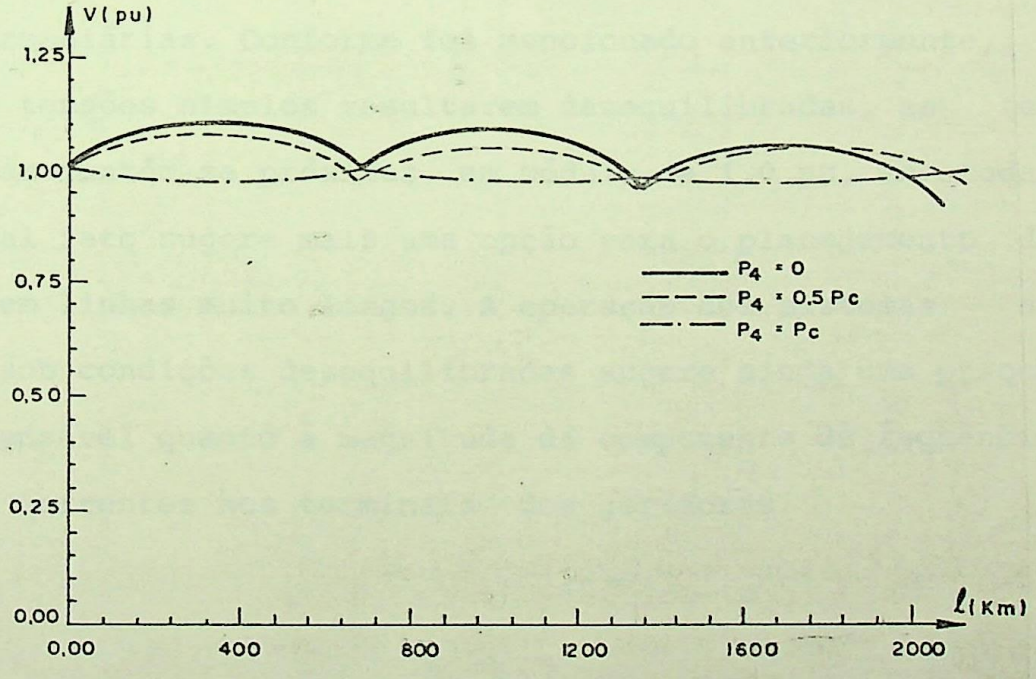


FIGURA 6.5 - PERFIS DA TENSÃO NA FASE-A PARA P_4=0, 0,5 P_C E P_C, SEM CARGAS INTERMEDIÁRIAS.

A tabela 6.1 a seguir resume alguns resultados referentes aos valores das tensões simples e compostas nas barras 2, 3 e 4 do sistema descrito na figura anterior, supondo equilibradas as tensões impostas à barra de referência, (barra 1). Observa-se, de um modo geral, que o controle implementado mantém as tensões compostas equilibradas e próximas, em módulo, de 1 pu, em todas as barras, muito embora isso ocasione um certo desequilíbrio nas tensões simples, que se agrava à medida em que o ponto de compensação se afasta da barra de referência. Em módulo tais desequilíbrios podem ser controlados, até certos limites, externamente ao compensador, através de um ajuste sobre cada uma das fases da fonte de tensão de referência, que independe do sistema.

A tabela 6.1 mostra ainda, na última coluna, as tensões resultantes nas barras por ocasião da alimentação de cargas monofásicas intermediárias. Conforme foi mencionado anteriormente, a despeito das tensões simples resultarem desequilibradas, as tensões compostas mantém-se próximas, em módulo, a 1,0 pu, em todas as barras. Tal fato sugere mais uma opção para o planejamento da transmissão em linhas muito longas. A operação dos sistemas de transmissão sob condições desequilibradas sugere ainda uma preocupação indispensável quanto à magnitude da componente de sequência negativa das correntes nos terminais dos geradores.

TABELA 6.1 - AS TENSÕES RESULTANTES NAS BARRAS

V_B=750 kV S_B=2138 MVA (SIL)	FASE	$P_2 = 0$ $P_3 = 0$ $P_4 = 0$	$P_2 = 0$ $P_3 = 0$ $P_4 = 0{,}5P_C$	$P_2 = 0$ $P_3 = 0$ $P_4 = P_C$	$P_2 = 0{,}2\ P_C$ $P_3 = 0{,}2\ P_C$ $P_4 = 0{,}5\ P_C$	$P_2 = 0{,}2\ P_C^b$ $P_3 = 0{,}1\ P_C^a$ $P_4 = 0{,}5\ P_C$
$\dot{V}_2$	A	1.01 $-1{,}2^o$	.99 $-22{,}5^o$	1.04 $-57{,}1^o$	.99 $-44{,}6^o$	.98 $-21{,}3^o$
	B	1.03 $-119{,}7^o$	1.01 $-144{,}0^o$	.99 $-174{,}2^o$	1.00 $-166{,}3^o$	.92 $-154{,}1^o$
	C	.99 $120{,}0^o$	1.02 $96{,}9^o$	.97 $62{,}0^o$	1.02 $75{,}0^o$	1.13 $89{,}7^o$
	AB	1.01 $29{,}8^o$	1.01 $6{,}8^o$	.99 $-26{,}5^o$	1.00 $-15{,}3^o$	1.00 $1{,}45^o$
	BC	1.01 $-90{,}4^o$	1.01 $-113{,}3^o$	1.00 $-146{,}4^o$	1.00 $-135{,}3^o$	1.00 $-118{,}6^o$
	CA	1.01 $149{,}7^o$	1.01 $126{,}8^o$	1.00 $93{,}5^o$	1.00 $104{,}7^o$	1.00 $121{,}5^o$
$\dot{V}_3$	A	.98 $-3{,}3^o$	.98 $-47{,}8^o$	1.00 $-109{,}3^o$	.98 $-79{,}5^o$	1,03 $-53{,}4^o$
	B	1.07 $-120{,}3^o$	1.05 $-165{,}9^o$	.99 $130{,}4^o$	1.05 $161{,}9^o$	1.00 $-170{,}8^o$
	C	.98 $122{,}2^o$	.99 $76{,}5^o$	1,01 $10{,}2^o$	.99 $44{,}2^o$	.98 $66{,}1^o$
	AB	1.01 $29{,}6^o$	1.01 $-15{,}6^o$	1.00 $-79{,}6^o$	1.01 $-47{,}7^o$	1.00 $-22{,}6^o$
	BC	1.01 $-90{,}5^o$	1.01 $-135{,}8^o$	1.00 $160{,}5^o$	1.01 $-167{,}8^o$	1.01 $-142{,}7^o$
	CA	1.01 $149{,}5^o$	1.01 $104{,}2^o$	1.00 $40{,}4^o$	1.01 $72{,}2^o$	1.00 $97{,}3^o$
$\dot{V}_4$	A	.96 $-4{,}4^o$	1.01 $-72{,}2^o$	.99 $-162{,}7^o$	1.01 $-103{,}5^o$	1.11 $-76{,}7^o$
	B	1.08 $-120{,}7^o$	1.07 $174{,}4^o$	1.05 $81{,}7^o$	1.06 $141{,}9^o$	.98 $171{,}6^o$
	C	.97 $123{,}5^o$	.94 $54{,}4^o$	.96 $-37{,}6^o$	.95 $21{,}8^o$	.92 $40{,}5^o$
	AB	1.01 $29{,}5^o$	1.00 $-37{,}7^o$	1.00 $-129{,}5^o$	1.00 $-69{,}8^o$	1.00 $-44{,}7^o$
	BC	1.01 $-90{,}5^o$	1.01 $-157{,}8^o$	1.00 $110{,}5^o$	1.01 $170{,}0^o$	1.00 $-164{,}9^o$
	CA	1.00 $149{,}4^o$	1.00 $82{,}1^o$	1.00 $-9{,}6^o$	1.00 $50{,}0^o$	1.00 $75{,}2^o$

Sob as condições de carregamento descritas, a figura 6.6 mostra os perfis das componentes de sequência positiva e negativa das correntes ao longo da referida linha.

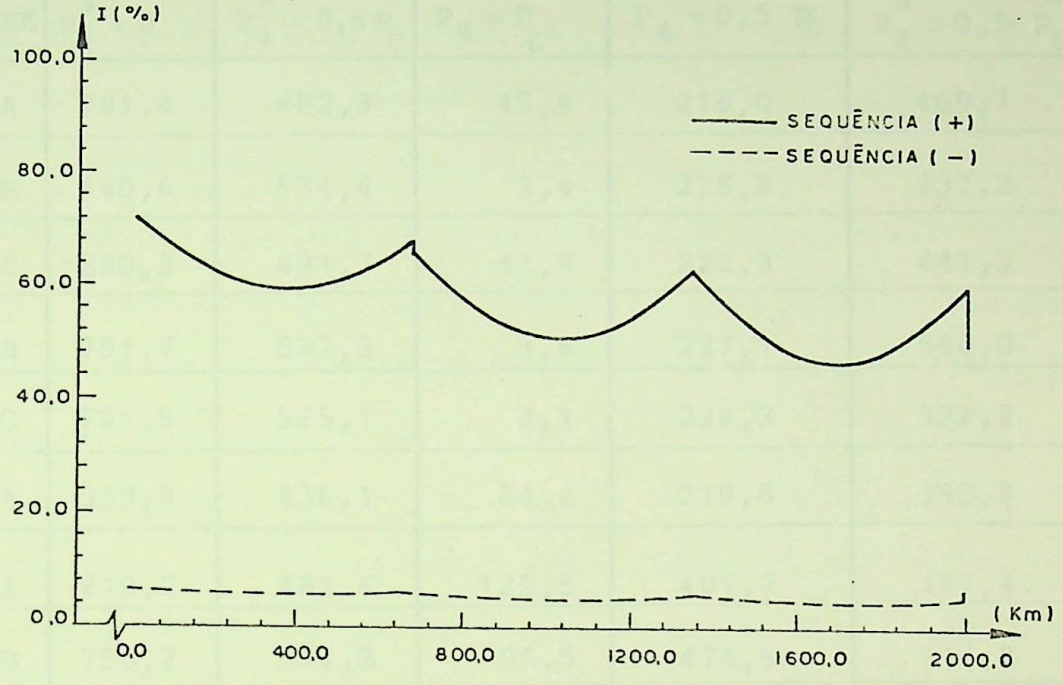


FIGURA 6.6 - PERFIS DAS CORRENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA, EM VALORES PERCENTUAIS, SOB A CONDIÇÃO DE CARGA: $P_2 = 0{,}2\ P_C$ (FASE-B), $P_3 = 0{,}2\ P_C$ (FASE-A) E $P_4 = 0{,}5\ P_C$.

Em seguida, apresentam-se resumidas na tabela 6.2 as contribuições dos reatores chaveados a tiristores - "TCR" sob as mesmas condições de carregamento descritas na tabela 6.1 .

TABELA 6.2 - A CONTRIBUIÇÃO DOS REATORES

V_B = 750kV S_B = 2138 MVA (SIL)		POTÊNCIA REATIVA EM MVAr				
BARRA	FASE	$P_2 = 0$ $P_3 = 0$ $P_4 = 0$	$P_2 = 0$ $P_3 = 0$ $P_4 = 0{,}5\,P_C$	$P_2 = 0$ $P_3 = 0$ $P_4 = P_C$	$P_2 = 0{,}2\,P_C$ $P_3 = 0{,}2\,P_C$ $P_4 = 0{,}5\,P_C$	$P_2 = 0{,}2\,P_C^b$ $P_3 = 0{,}1\,P_C^a$ $P_4 = 0{,}5\,P_C$
2	A	701,4	482,3	45,9	216,0	469,7
	B	640,6	534,4	3,4	225,8	437,2
	C	620,3	491,7	41,9	222,3	441,3
	AB	701,7	537,3	3,6	227,1	560,0
	BC	701,5	535,1	3,1	226,3	392,2
	CA	559,3	436,1	84,4	210,8	395,8
3	A	619,2	481,6	125,5	401,7	497,4
	B	750,2	574,2	96,5	474,6	514,2
	C	616,2	485,8	124,4	416,3	491,3
	AB	708,6	548,3	98,5	446,0	495,5
	BC	708,6	550,5	95,7	468,1	536,4
	CA	562,3	442,7	152,2	378,5	471,0
4	A	305,8	215,5	118,1	219,8	247,9
	B	387,9	307,1	170,2	298,4	300,6
	C	308,0	243,7	180,5	243,7	204,4
	AB	359,6	240,1	90,0	243,8	312,9
	BC	359,7	333,2	232,4	321,4	301,3
	CA	282,4	192,9	146,4	197,1	138,8

De realçar, na tabela 6.2, que as contribuições dos reatores são cada vez menores à medida que o ponto de compensação se afasta da barra de referência. Tal fato decorre do comprimento da linha simulada (ℓ = 2000 km). Por sua vez, à medida que a carga no terminal receptor da linha aumenta até um valor próximo à potência característica da mesma, também se observa, como seria de esperar, uma redução na potência de compensação do compensador. Por outro lado, as contribuições dos reatores observados para um regime de funcionamento da linha equivalente ao característico (P_2=P_c), decorrem da presença de um degrau de compensação capacitiva igual a 180 MVAr/(fase.banco), em todos os barramentos. Associada à necessidade de se dispor de um degrau de compensação capacitiva para compensar os desequilíbrios da própria linha, a presença desta última em todos os barramentos, para a condição de carga em análise, decorre da existência de uma limitação no programa - CELINTRA - cujo Manual de Usuário encontra-se descrito no Anexo V.

O dimensionamento dos reatores a partir da equação 5.19, proposta por Kimbark[18], resulta numa potência reativa, por fase, por banco, igual a 610 MVAr que é da mesma ordem de grandeza da média obtida (550 MVAr) entre as fases e os pontos de compensação para a condição de linha em vazio mostrada na tabela 6.2. Por outro lado, os degraus de compensação capacitiva devem ser compatibilizados com o controle desejado sobre as tensões.

6.4 - CONCLUSÕES

A compensação de linhas de transmissão apresentada neste capítulo pode se constituir numa das soluções de longo prazo para os problemas associados à transmissão de energia por linhas muito longas. Os perfis das tensões, mostradas na figura 6.5, demonstram que a idéia de compensar as linhas para potência característica é factível, desde que se disponha de um controle eficaz das tensões nos pontos pré-definidos. A consecução de tal objetivo só é exequível a partir da utilização de compensadores estáticos que, por sua vez, independentemente da carga, permitem atender a evolução natural do sistema que venha a requerer o suprimento de cargas localizadas ao longo da rota da linha. Enfim, entre outras vantagens deste tipo de compensação, destacam-se ainda:

- O controle dos desequilíbrios das tensões entre fases, face à alimentação de cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas desequilibradas.

- A utilização de um compensador em cada barra do sistema para compensar duas (ou mais) linhas em paralelo.

CAPITULO 7

CONCLUSÕES GERAIS

CAPITULO 7

CONCLUSÕES GERAIS

A apresentação das principais conclusões referendadas nos capítulos anteriores dar-se-á segundo a estruturação adotada neste trabalho e proposta no seu capítulo inicial. Assim, como resultados relevantes, destacam-se:

- na primeira parte, a modelagem de um ciclo de transposição de condutores (dois esquemas) em linhas de transmissão. A implementação de tais modelos é facilmente obtida através da utilização do conceito da matriz de disposição dos condutores de fase que, por sua vez, são notabilizados nos diversos trechos da linha disponíveis. Assim, a contabilização das posições que os condutores ocupam nos trechos adjacentes ao ponto de transposição fica extremamente facilitada.

- na segunda parte, por sua vez, ficam consolidados os princípios que permitem definir a natureza dos parâmetros em série e em derivação dos bancos de compensação das linhas. Se o comprimento desta última for menor que $\lambda/2$, a compensação da linha é feita a partir de indutores em derivação ou capacitores em série, ou através da compensação mista convencional. Por outro lado, se o comprimento da linha for maior que $\lambda/2$, então a compensação da linha realiza-se por intermédio de capacitores em derivação ou indutores em série, ou através da compensação mista não con

vencional, ou seja, as duas últimas compensações utilizadas simultaneamente. De realçar os resultados das grandezas de tensão e corrente obtidas nos terminais da linha compensada convencionalmente. Tais grandezas aparecem naturalmente desequilibradas em decorrência da não utilização de transposições de condutores ao longo da linha.

- na terceira parte, por outro lado, sob a designação de compensação não convencional (capítulo - 5), ou seja, a compensação da linha para meia-onda e para potência característica, apresenta-se o comportamento das tensões e correntes nas três fases da linha de meia-onda de comprimento natural ou compensada para tal, face a um valor e natureza da carga no terminal receptor da linha. Os problemas do baixo rendimento da transmissão em meia-onda, em vazio ou em carga leve, assim como as sobretensões sustentadas que aparecem na linha nas condições de carga pesada ou baixo fator de potência, podem ser, em parte, resolvidos através da utilização de duas medidas operativas que, num estágio inicial operaria a linha com um valor de tensão abaixo do nominal, e num estágio final ou emergencial, operaria a linha de meia-onda com um valor de tensão maior que a nominal. A adoção de tais medidas operativas melhoraria, significativamente, o desempenho da linha nas condições de carga citadas. Para isso, bastaria dispor de tapes de transformadores bem como um sistema de excitação dos geradores, que juntos, fôssem capazes de atender as necessidades operativas da linha. Outro problema, associado à transmissão de energia em meia-onda, diz respeito à suprimento de cargas intermediárias. A filosofia de

compensação de linhas proposta por Kimbark[18] parece contornar mais esta dificuldade. Na verdade, a utilização prática da compensação para potência característica corresponde, em princípio, a fazer variar continuamente os parâmetros da linha de modo a relacionar a "nova" impedância característica da linha com a carga no seu terminal receptor. Tal propósito só se viabiliza através de um controle capaz de manter fixas as tensões nos pontos desejados. Os resultados obtidos para as tensões e correntes aproximam-se tanto mais daqueles obtidos com a linha em regime característico, quanto mais distribuida for a compensação ao longo da linha. Assim, no capítulo - 6, os resultados obtidos através do fluxo de carga trifásico apresentam-se notavelmente satisfatórios, quando se pretende controlar as tensões entre fases que são, em princípio, naturalmente desequilibradas face à alimentação de cargas com elevado grau de desequilíbrio entre fases ou decorrentes da não utilização de transposições de condutores ao longo da linha.

Diante dos vários aspectos, ainda pouco conhecidos, da transmissão de energia por linhas muito longas, é de se acreditar que o presente trabalho sirva como base para o desenvolvimento de outros estudos no sentido de atender tais expectativas. Assim sendo, sugere-se a consecução dos seguintes estudos adicionais:

- a execução dos mesmos estudos desenvolvidos neste trabalho, para linhas de transmissão muito longas, considerando sistemas polifásicos.

- o desenvolvimento de modelos que permitam representar a linha de meia-onda nos programas computacionais já existentes e utilizados pelo setor elétrico.

- a análise, regime permanente ou emergencial, da operação em paralelo entre circuitos de meia-onda.

- a análise de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em linhas de meia-onda, tais como aqueles que resultam da energização, da ocorrência de faltas e da rejeição de carga.

- a compensação estática de linhas com controle de tensão fase-neutro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - HESSE, H.M.- "Electromagnetic and Eletrostatic Transmission-Line Parameters by Digital Computer", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 82, pp. 282-291, June 1963.

[2] - GALLOWAY, R.H.; SHORROCKS, W.B. and WEDEPOHL, L.M. - "Calculation of Electrical Parameters for Short and Long Polyphase Transmission Lines" - IEE Proceedings, Vol. 111, nº 12, pp. 2051-2059, December 1964.

[3] - CARSON, J.R. - "Wave Propagation in Overhead Wires With Ground Return" - Bell Syst. Tech. Journal, pp. 539, 1926.

[4] - FUCHS, R.D.- "Transmissão de Energia Elétrica/Linhas Aéreas" LTC - Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 29 Edição-Julho de 1979 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil.

[5] - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, Grupo ELETROBRÁS - "Projeto Trapézio/Relatório Final", pp. 16, Dezembro de 1980, Rio de Janeiro.

[6] - WEDEPOHL, L.M.- "Application of Matrix Methods to the Solution of Travèling Wave Phenomena in Polyphase Systems" - IEE Proceedings, Vol. 110, pp. 2200-2212, December 1963.

[7] - HUMPAGE, W.D.; WONG, K.P. and NGUYEN, T.T.- "Operating Unbalance in Long Distance Transmission" - IEE Proceeding , Vol. 132, pp. 67-75, March 1985.

[8] - ARRILLAGA, J.; ACHA, E.; DENSEM and BODGER, P.S. - "Ineffectiveness of Transmission Line Transpositions at Harmonic

Frequencies" - IEE Proceedings, Vol. 133, pp. 99-104, March 1986.

[9] - DUBOIS, E.W.; FAIRMAN, J.F.; MARTIN, Jr.D.E.; MURPHY, C.M. and WARD, J.B.- "Extra-Long-Distance-Transmission" - Trans. AIEE, Power Apparatus and Systems, Vol. 80, pp. 1108-1116 , February 1962

[10]- GCPS/GTCP, Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema Elétrico/Grupo de Trabalho para Estabelecer Critérios de Planejamento - "O Dimensionamento da Compensação Série", Revista Eletricidade Moderna, pp. 14-22, Agosto 1987.

[11]- HUBERT, F.J. and GENT, M.R.- "Half-Wave-Lenght Power Transmission Lines" - IEEE Trans. Power Apparatus and Systems , Vol. PAS-84, pp. 965-974, October 1965.

[12]- PRABHAKARA, F.S.; PARTHASARATHY, K. and RAMACHANDRA RAO, H. N.- "Analysis of Natural Half-Wave-Lenght Power Transmission Lines" - IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pp. 1787-1794, December 1969.

[13]- PRABHAKARA, F.S.; PARTHASARATHY, K. and RAMACHANDRA RAO, H. N.- "Performance of Tuned Half-Wave-Lenght Power Transmission Lines" - IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pp. 1795-1801, December 1969.

[14]- ROBERTSON, S.D.T.; JANISCHEWSKYS, W. and UMAMAHES'WARAN, V. S.- "Operational Characteristics of Tuned AC Lines" - International Conference on "High Voltage DC and/or AC Power Transmission", 19 to 23 November 1973/Organized by the Power

Division of the IEE, pp. 287-291.

[15]- JANISCHEWSKYS, W. and ROBERTSON, S.D.T.- "Economic Comparison of Conventional Tuned AC and HVDC Lines for Transmission of Energy from the Canadian Arctic" - Ib. (14).

[16]- PAVEL, C.O.- "Linhas de Transmissão em Meia Onda", VI-SNPTEE, G-IV/GSP, Balneário Camboriú/SC-Brasil, 1981.

[17]- MEDEIROS, J.C.- "Transmissão em UAT-CA e EAT-CC, Estado da Arte, Capacitação Industrial, Programas de Desenvolvimento Tecnológico" - CPTA - Comissão de Planejamento da Transmissão da Amazônia, X-SNPTEE, G-IV/GSP, Curitiba-PR/Brasil, Outubro de 1989.

[18]- KIMBARK, E.W.- "A New Look at Shunt Compensation", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 212-218, January 1983.

[19]- HUMPAGE, W.D. and NGUYEN, T.T.- "Developments in Phase - Variable Modelling for Thyristor-Controlled Reactive-Power Compensators", IEE proceedings, Vol. 132, pp. 67-75, March 1985.

[20]- WASLEY, R.G. and SHLASH, M.A.- "Newton-Raphson Algorithm for 3-Phase Load Flow" - IEE Proceeding, Vol. 121, No. 7 , pp. 630-638, July 1974.

[21]- EL-ABIAD, A.H.; BIRT, K.A; GRAFFY, J.J. and McDONALD, J.D. - "Three-Phase Load Flow Program" - IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 95, No. 1, pp. 59-65, January / February 1976.

[22]- BOWMAN, W.I. and McNAMEE, J.M.- "Development of Equivalent Pi and T Matrix Circuits for Long Untransposed Transmission lines", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, pp. 625-632, June 1964.

[23]- ARRILLAGA, J.; DENSEM, T.J. and HANKER, B.J.- "Zero Sequence Harmonic Current Generation in Transmission Lines Connected to Large Plants" - IEEE Trans. Power Apparatus and Systems , Vol. 102, No. 7, pp. 2357-2363, July 1983.

[24]- LAUGHTON, M.A. and Others- "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co-Ordinates - Part 1" - IEE Proceedings, Vol. 115, No. 8, pp. 1163-1172, August 1968.

[25]- NUNES, R.A.F. e PIRES, R.C.- "Compensação Não Convencional de Linhas de Transmissão Muito Longas", X-SNPTEE, G-IV/GSP-12, Curitiba-PR, Brasil, Outubro de 1989.

[26]- ILICETO, F. and CINIERI, E.- "Analysis of Half-Wave - Length Transmission Lines With Simulation of Corona Losses" - IEEE/ Power Delivery - vol. 3, nº 4, Outubro 1988.

[27]- SHCHERBAKOV, V.K., Editor- "A-C Power Transmision Over Distances of 1500 to 3000 km", Proceedings of the Siberian Scientific-Research, Institute for Power Engineering, USSR - 1964 (Translated from Russian by Israel Program for Scientific - Translations - Jerusalém, 1968).

A N E X O S

A N E X O - I

A MATRIZ DE ADMITÂNCIAS NODAIS REPRESENTATIVA DE UM SISTEMA QUE UTILIZA COMPENSADORES ESTÁTICOS

A N E X O - I

A MATRIZ DE ADMITÂNCIAS NODAIS REPRESENTATIVAS DE UM SISTEMA QUE UTILIZA COMPENSADORES ESTÁTICOS

I.1 - INTRODUÇÃO

É bem conhecido que as linhas de transmissão podem ser modeladas através dos circuitos Pi ou T, cujos parâmetros, em função do comprimento e do nível da tensão de operação da linha, devem ser corrigidos [4]. No âmbito da análise de sistemas elétricos, o componente linha de transmissão é comumente representado através de um ou mais circuito Pi, nos quais, metade da susceptância transversal da linha ou trecho correspondente é conectada em cada extremidade do circuito. Assim sendo, na figura I.1, representam-se, esquematicamente, as impedâncias longitudinais de uma linha de transmissão trifásica, supostamente existente entre os barramentos 1 e 2 [21].

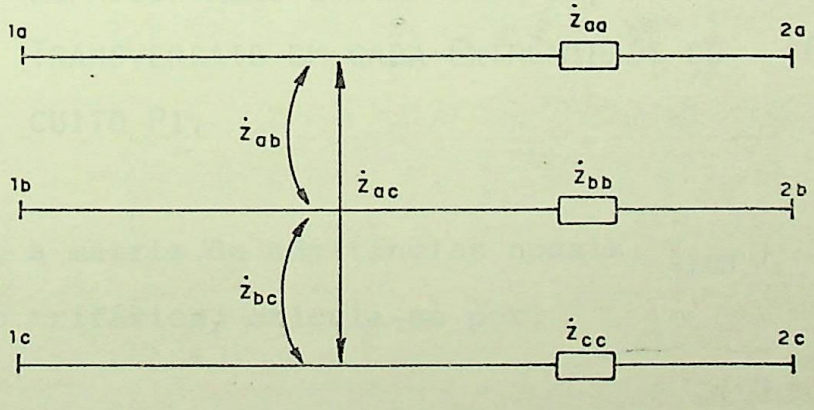


FIGURA I.1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICA.

E a figura I.2, por sua vez, descreve as admitâncias transversais da mesma linha de transmissão em cada extremidade do circuito Pi, ou seja, nos barramentos 1 e 2.

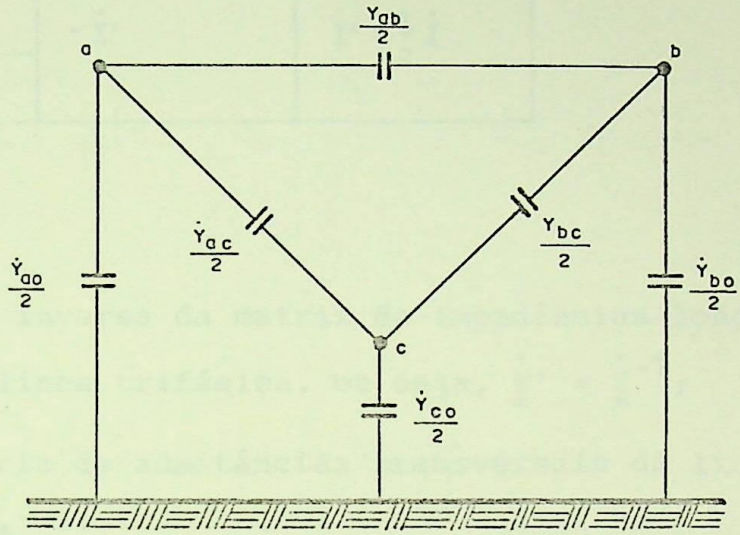


FIGURA I.2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS EM CADA EXTREMIDADE DO CIRCUITO PI.

Desta forma, a matriz de admitâncias nodais, $\dot{\underline{Y}}_{BUS}$, da linha de transmissão trifásica, calcula-se por:

$$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{BUS} =$$

NÓS	1	2	3	4	5	6
1						
2	$\dot{\underline{\underline{Y}}}' + \frac{1}{2}\dot{\underline{\underline{Y}}}$			$-\dot{\underline{\underline{Y}}}'$		
3						
4						
5	$-\dot{\underline{\underline{Y}}}'$			$\dot{\underline{\underline{Y}}}' + \frac{1}{2}\dot{\underline{\underline{Y}}}$		
6						

(I.1)

onde:

$\dot{\underline{\underline{Y}}}'$ - É a inversa da matriz de impedâncias longitudinais da linha trifásica, ou seja, $\dot{\underline{\underline{Y}}}' = \dot{\underline{\underline{Z}}}^{-1}$;

$\dot{\underline{\underline{Y}}}$ - Matriz de admitâncias transversais da linha trifásica.

No caso de linhas longas as matrizes $\dot{\underline{\underline{Z}}}$ e $\dot{\underline{\underline{Y}}}$ devem ser corrigidas de modo a que incorporem os efeitos resultantes da distribuição de parâmetros.

Neste caso, a matriz de impedâncias longitudinais, $\dot{\underline{\underline{Z}}}$, é calculada por[21]:

$$\dot{\underline{\underline{Z}}} = \operatorname{senh}(\dot{\underline{\underline{\psi}}} \cdot \ell) \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_C \qquad (I.2)$$

enquanto a matriz de admitâncias transversais, em cada extremidade da seção Pi, é calculada pela expressão:

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{\underline{\underline{Y}}} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot \tanh\left(\dot{\underline{\underline{\psi}}} \cdot \frac{\ell}{2}\right) \qquad (I.3)$$

Aplicando-se a propriedade matricial descrita pela equação 3.50 às duas últimas equações, resultam:

$$\dot{\underline{\underline{Z}}} = \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \operatorname{senh}\left(\dot{\underline{\underline{\gamma}}} \cdot \ell\right) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \cdot \dot{\underline{\underline{Z}}}_C \qquad (I.4)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{\underline{\underline{Y}}} = \dot{\underline{\underline{Y}}}_C \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}} \cdot \tanh\left(\dot{\underline{\underline{\gamma}}} \cdot \frac{\ell}{2}\right) \cdot \dot{\underline{\underline{Q}}}^{-1} \qquad (I.5)$$

I.2 - A MATRIZ $\dot{\underline{\underline{Y}}}_{BUS}$ DO SISTEMA COMPENSADO

Ao se incorporar o modelo de um compensador estático[19], a matriz de admitâncias nodais do sistema original, $\dot{\underline{\underline{Y}}}_{BUS}$, transforma-se em:

$$\dot{\underline{\underline{Y}}}^{c}_{BUS} = \qquad (I.6)$$

NÓS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2									
3									
4							$-B_s$		
5								$-B_s$	
6									$-B_s$
7				$-B_s$			B_s		
8					$-B_s$			B_s	
9						$-B_s$			B_s

onde os nós:

1,2 e 3 - representam a barra de referência;

4,5 e 6 - representam o barramento k;

7,8 e 9 - representam o barramento m;

e a variável, $B_S=1/X_S$, representa a susceptância "slope" dos reatores. Aos elementos $\dot{y}^c_{bus\ (4,4)}$, $\dot{y}^c_{bus\ (5,5)}$ e $\dot{y}^c_{bus\ (6,6)}$ devem ser contabilizados as susceptâncias indutiva e capacitiva correspondentes aos reatores e banco de capacitores, respectivamente. Como não há qualquer ligação entre os barramentos de referência e m, os elementos correspondentes na matriz $\dot{\underline{\underline{Y}}}^c_{Bus}$ são nulos.

A N E X O - II

A DEFINIÇÃO DO JACOBIANO DE UM SISTEMA QUE UTILIZA COMPENSADORES ESTÁTICOS

A N E X O - II

A DEFINIÇÃO DO JACOBIANO DE UM SISTEMA QUE UTILIZA COMPENSADORES ESTÁTICOS

II.1 - INTRODUÇÃO

A definição da matriz Jacobiano de um sistema que utiliza compensadores estáticos parte da premissa de que são necessárias doze funções residuais, por imposição do modelo de um único compensador, para o cálculo das tensões nos barramentos deste sistema. Portanto, as derivadas parciais serão determinadas a partir do conjunto de equações 6.4 a 6.12 [19].

Por outro lado, por uma questão de simplicidade, apenas as derivadas parciais relativas a uma das fases, e quando for o caso, a um par de fases, serão apresentadas a seguir. Ainda por uma questão de comodidade, todo o equacionamento do fluxo de potência foi processado em forma retangular, portanto, as partes real e imaginária das tensões nodais serão representadas pelas variáveis a e b, respectivamente.

II.2 - FUNÇÕES RESIDUAIS DERIVADAS DO CONTROLE DO MÓDULO DE TENSÃO

Assim, a equação 6.7 escrita em forma retangular, resulta em:

$$F_{ab} = (a_a^k - a_b^m)^2 + (b_a^k - b_b^m)^2 - |\dot{V}_{ab}^r|^2 \qquad (II.1)$$

e as derivadas parciais, calculam-se por:

$$\frac{\partial F_{ab}}{\partial a_a^k} = 2\ (a_a^k - a_b^m) \qquad \text{(II.2)}$$

$$\frac{\partial F_{ab}}{\partial a_b^m} = -\ 2\ (a_a^k - a_b^m) \qquad \text{(II.3)}$$

$$\frac{\partial F_{ab}}{\partial b_a^k} = 2\ (b_a^k - b_b^m) \qquad \text{(II.4)}$$

$$\frac{\partial F_{ab}}{\partial b_b^m} = -\ 2\ (b_a^k - b_b^m) \qquad \text{(II.5)}$$

II.3 - Funções Residuais Derivadas das Perdas Ativas Nulas nas Fontes de Tensão de Referência

Já a equação 6.10, em forma retangular, escreve-se:

$$P_{ab} = B_s \cdot [-(a_a^k - a_b^m) \cdot (b_b^k - b_b^m) + (a_b^k - a_b^m) \cdot (b_a^k - b_b^m)] \qquad \text{(II.6)}$$

As derivadas parciais de P_{ab} conduzem às seguintes expressões:

$$\frac{\partial P_{ab}}{\partial a_a^k} = -\ B_s\ .\ (b_b^k - b_b^m) \qquad \text{(II.7)}$$

$$\frac{\partial P_{ab}}{a_b^m} = - B_s \cdot (b_a^k - b_b^k) \qquad \text{(II.8)}$$

$$\frac{\partial P_{ab}}{\partial b_b^k} = - B_s \cdot (a_a^k - a_b^m) \qquad \text{(II.9)}$$

$$\frac{\partial P_{ab}}{\partial b_b^m} = B_s \cdot (a_a^k - a_b^k) \qquad \text{(II.10)}$$

$$\frac{\partial P_{ab}}{\partial a_b^k} = B_s \cdot (b_a^k - b_b^m) \qquad \text{(II.11)}$$

$$\frac{\partial P_{ab}}{\partial b_a^k} = B_s \cdot (a_b^k - a_b^m) \qquad \text{(II.12)}$$

II.4 - Funções Residuais Derivadas do Balanço de Potência

A equação 6.4, agora separada nas suas partes real e imaginária, pode ser representada pelas equações:

$$P_a^k = P_{aN}^k - P_{ar}^k - P_{aL}^k \qquad \text{(II.13)}$$

$$Q_a^k = Q_{aN}^k - Q_{ar}^k - Q_{aL}^k \qquad \text{(II.14)}$$

Nas equações anteriores, a contribuição da rede calcula-se por:

$$P_{aN}^k = a_a^k \cdot \sum_j (G_{kj} \cdot a_i^j - B_{kj} \cdot b_i^j) + b_a^k \cdot \sum_j (G_{kj} \cdot b_i^j + B_{kj} \cdot a_i^j) \qquad \text{(II.15)}$$

$$Q_{aN}^k = b_a^k \cdot \sum_j (G_{kj} \cdot a_i^j - B_{kj} \cdot b_i^j) - a_a^k \cdot \sum_j (G_{kj} \cdot b_i^j + B_{kj} \cdot a_i^j) \qquad \text{(II.16)}$$

onde, G_{kj} e B_{kj}, respectivamente, representam as partes real (condutância) e imaginária (susceptância) do elemento $\dot{y}_{kj}$ da matriz de admitâncias nodais, $\underline{\underline{\dot{Y}}}^c_{BUS}$, do sistema compensado.

A contribuição da fonte de tensão de referência é calculada através das expressões:

$$P_{ar}^k = a_a^k \cdot B_s \cdot (b_b^m - b_b^k) - b_a^k \cdot B_s \cdot (a_b^m - a_b^k) \qquad \text{(II.17)}$$

$$Q_{ar}^k = a_a^k \cdot B_s \cdot (a_b^m - a_b^k) + b_a^k \cdot B_s \cdot (b_b^m - b_b^k) \qquad \text{(II.18)}$$

Já a carga, P_{aL}^k e Q_{aL}^k, é contabilizada diretamente nas equações II.13 e II.14, respectivamente.

Por outro lado, a contribuição da rede conduz às seguintes derivadas parciais:

$$\frac{\partial P_{aN}^{k}}{\partial a_i^j} = G_{kk} \cdot a_i^k + B_{kk} \cdot b_i^k + R_e(\dot{I}_{aN}^k), \text{ para } k=j \qquad \text{(II.19)}$$

$$= G_{kj} \cdot a_i^k + B_{kj}\, b_i^k , \quad \text{para } k \neq j$$

$$\frac{\partial P_{aN}^{k}}{\partial b_i^j} = G_{kk} \cdot b_i^k - B_{kk} \cdot a_i^k + I_m(\dot{I}_{aN}^K), \text{ para } k=j \qquad \text{(II.20)}$$

$$= G_{kj} \cdot b_i^k - B_{kj} \cdot a_i^k , \text{ para } k \neq j$$

$$\frac{\partial Q_{aN}^{k}}{\partial a_i^j} = G_{kk} \cdot b_i^k - B_{kk} \cdot a_i^k - I_m(\dot{I}_{aN}^k), \text{ para } k=j \qquad \text{(II.21)}$$

$$= G_{kj} \cdot b_i^k - B_{kj} \cdot a_i^k , \text{ para } k \neq j$$

$$\frac{\partial Q_{aN}^{k}}{\partial b_i^j} = -G_{kk} \cdot a_i^k - B_{kk} \cdot b_i^k + R_e(\dot{I}_{aN}^k), \text{ para } k=j \qquad \text{(II.22)}$$

$$= - G_{kj} \cdot a_i^k - B_{kj} \cdot b_i^k, \text{ para } k \neq j$$

onde,

$$R_e(\dot{I}_{aN}^k) = \sum_j (G_{kj} \cdot a_i^j - B_{kj} \cdot b_i^j) \qquad \text{(II.23)}$$

$$I_m(\dot{I}_{aN}^k) = \sum_j (G_{kj} \cdot b_i^j + B_{kj} \cdot a_i^j) \qquad \text{(II.24)}$$

para: $i = a,b,c$

As derivadas parciais resultantes da contribuição da fonte de tensão de referência são as seguintes:

$$\frac{\partial P_{ar}^k}{\partial a_a^k} = - B_s \cdot (b_b^k - b_b^m) \qquad \text{(II.25)}$$

$$\frac{\partial P_{ar}^k}{\partial b_b^m} = B_s \cdot a_a^k \qquad \text{(II.26)}$$

$$\frac{\partial P_{ar}^k}{\partial b_b^k} = - B_s \cdot a_a^k \qquad \text{(II.27)}$$

$$\frac{\partial P^k_{ar}}{\partial b^k_a} = B_s \cdot (a^k_b - a^m_b) \qquad \text{(II.28)}$$

$$\frac{\partial P^k_{ar}}{\partial a^m_b} = - B_s \cdot b^k_a \qquad \text{(II.29)}$$

$$\frac{\partial P^k_{ar}}{\partial a^k_b} = B_s \cdot b^k_a \qquad \text{(II.30)}$$

$$\frac{\partial Q^k_{ar}}{\partial a^k_a} = - B_s \cdot (a^k_b - a^m_b) \qquad \text{(II.31)}$$

$$\frac{\partial Q^k_{ar}}{\partial b^m_b} = B_s \cdot b^k_a \qquad \text{(II.32)}$$

$$\frac{\partial Q^k_{ar}}{\partial b^k_b} = - B_s \cdot b^k_a \qquad \text{(II.33)}$$

$$\frac{\partial Q^k_{ar}}{\partial b^k_a} = - B_s \cdot (b^k_b - b^m_b) \qquad \text{(II.34)}$$

$$\frac{\partial Q_{ar}^{k}}{\partial a_{b}^{m}} = B_s \cdot a_a^k \qquad \text{(II.35)}$$

$$\frac{\partial Q_{ar}^{k}}{\partial a_{b}^{k}} = - B_s \cdot a_a^k \qquad \text{(II.36)}$$

II.5 - As Partições Matriciais do Jacobiano

As derivadas parciais resultantes das equações representativas do controle do módulo de tensão e das perdas ativas nulas devidas às fontes de tensão de referência, para as três fases, constituem-se nos elementos das partições matriciais $\underline{\underline{J}}_C(x)$ e $\underline{\underline{J}}_{CN}(x)$, descritas a seguir:

$\underline{\underline{J}}_C(x) =$

	a_a^m	a_b^m	a_c^m	b_a^m	b_b^m	b_c^m
P_{ca}	$-B_s(b_c^k-b_a^k)$			$B_s(a_c^k-a_a^k)$		
P_{ab}		$-B_s(b_a^k-b_b^m)$			$B_s(a_a^k-a_b^k)$	
P_{bc}			$-B_s(b_b^k-b_c^k)$			$B_s(a_b^k-a_c^k)$
F_{ca}	$-2(a_c^k-a_a^m)$			$-2(b_c^k-b_a^m)$		
F_{ab}		$-2(a_a^k-a_b^m)$			$-2(b_a^k-b_b^m)$	
F_{bc}			$-2(a_b^k-a_c^m)$			$-2(b_b^k-b_c^m)$

(II.37)

$$\underline{\underline{J}}_{CN}(x) = \begin{array}{c|cccccc} & a_a^k & a_b^k & a_c^k & b_a^k & b_b^k & b_c^k \\ \hline P_{ca} & B_s(b_c^k - b_a^m) & & -B_s(b_a^k - b_a^m) & -B_s(a_c^k - a_a^m) & & B_s(a_a^k - a_a^m) \\ P_{ab} & -B_s(b_b^k - b_b^m) & B_s(b_a^k - b_b^m) & & B_s(a_b^k - a_b^m) & -B_s(a_a^k - a_b^m) & \\ P_{bc} & & -B_s(b_c^k - b_c^m) & B_s(b_b^k - b_c^m) & & B_s(a_c^k - a_c^m) & -B_s(a_b^k - a_c^m) \\ F_{ca} & & & 2(a_c^k - a_a^m) & & & 2(b_c^k - b_a^m) \\ F_{ab} & 2(a_a^k - a_b^m) & & & 2(b_a^k - b_b^m) & & \\ F_{bc} & & 2(a_b^k - a_c^m) & & & 2(b_b^k - b_c^m) & \end{array} \qquad \text{(II.38)}$$

De realçar o cuidado em dispor os elementos na diagonal da matriz descrita pela equação II.37 e II.38 de forma a atender as propriedades do algorítimo de Newton-Raphson. De resto, as partições matriciais, $\underline{\underline{J}}_{Nc}(x)$ e $\underline{\underline{J}}_{N}^{C}(x)$, descritas abaixo, têm seus elementos definidos a partir das igualdades estabelecidas nas expressões II.13 e II.14.

É importante mencionar ainda que a partição matricial $\underline{\underline{J}}_{N}^{C}(x)$ deve ser subtraída daquela, $\underline{\underline{J}}_{N}(x)$, definida na equação 6.14[20,21], cujos elementos, adicionados àqueles elementos sublinhados na equação II.39, são calculados a partir das expressões II.19 a II.22.

$$\underline{\underline{J}}_{NC}(x) =$$

	a_a^m	a_b^m	a_c^m	b_a^m	b_b^m	b_c^m
P_a^k	$\underline{B_s\, b_a^k}$	$B_s\, b_a^k$		$-\underline{B_s\, a_a^k}$	$-B_s\, a_a^k$	
P_b^k		$\underline{B_s\, b_b^k}$	$B_s\, b_b^k$		$-\underline{B_s\, a_b^k}$	$-B_s\, a_b^k$
P_c^k	$B_s\, b_c^k$		$\underline{B_s\, b_c^k}$	$-B_s \cdot a_c^k$		$-\underline{B_s\, a_c^k}$
Q_a^k	$-\underline{B_s\, a_a^k}$	$-B_s\, a_a^k$		$-\underline{B_s\, b_a^k}$	$-B_s \cdot b_a^k$	
Q_b^k		$-\underline{B_s\, a_b^k}$	$-B_s\, a_b^k$		$-\underline{B_s \cdot b_b^k}$	$-B_s\, b_b^k$
Q_c^k	$-B_s\, a_c^k$		$-\underline{B_s\, a_c^k}$	$-B_s\, b_c^k$		$-\underline{B_s\, b_c^k}$

(II.39)

$$\underline{\underline{J}}_{N}^{C}(x) =$$

	a_a^k	a_b^k	a_c^k	b_a^k	b_b^k	b_c^k
P_{ar}^k	$-B_s(b_b^k - b_b^m)$	$B_s\, b_a^k$		$B_s(a_b^k - a_b^m)$	$-B_s \cdot a_a^k$	
P_{br}^k		$-B_s(b_c^k - b_c^m)$	$B_s\, b_b^k$		$B_s(a_c^k - a_c^m)$	$-B_s\, a_b^k$
P_{cr}^k	$B_s\, b_c^k$		$-B_s(b_a^k - b_a^m)$	$-B_s\, a_c^k$		$B_s(a_a^k - a_a^m)$
Q_{ar}^k	$-B_s(a_b^k - a_b^m)$	$-B_s\, a_a^k$		$-B_s(b_b^k - b_b^m)$	$-B_s\, b_a^k$	
Q_{br}^k		$-B_s(a_c^k - a_c^m)$	$-B_s\, a_b^k$		$-B_s(b_c^k - b_c^m)$	$-B_s\, b_b^k$
Q_{cr}^k	$-B_s\, a_c^k$		$-B_s(a_a^k - a_a^m)$	$-B_s\, b_c^k$		$-B_s(b_a^k - b_a^m)$

(II.40)

A N E X O - III

MANUAL DO PROGRAMA - PLINTRA

(PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

A N E X O - III

MANUAL DO PROGRAMA - "PLINTRA"

(PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO)

III.1- INTRODUÇÃO

O presente manual de utilização do programa "PLINTRA" (Parâmetros de Linhas de Transmissão) procura descrever, objetivamente, a montagem do arquivo de dados necessário à execução do referido programa. As metodologias de cálculo dos parâmetros estão descritas nos capítulos - 2 e 3 da Dissertação de Mestrado - "Compensação Não Convencional em Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica", EFEI-1989, bem como nas referências (1,2,3,4,6), também constantes no trabalho de dissertação supra-citado. Este programa permite calcular:

- As matrizes de impedâncias longitudinais e admitâncias transversais de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica, considerada como um sistema de N condutores.

- As matrizes de impedâncias e admitâncias sequenciais da linha com transposição e sem transposição de condutores.

- As características dos modos de propagação.

III.2- FLUXOGRAMA DO PROGRAMA - "PLINTRA"

O programa "PLINTRA" está estruturado de tal forma a permitir calcular, especificamente os seguintes parâmetros:

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_c$ - Matriz de impedâncias próprias dos condutores.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_g$ - Matriz de impedâncias devido a disposição geométrica dos condutores - face ao retorno perfeito das correntes.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_t$ - Matriz de impedâncias devido a disposição geométrica dos condutores - face ao retorno imperfeito das correntes.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}$ - Matriz de impedâncias longitudinais - completa e reduzida.

$\dot{\underline{\underline{Z}}}_{012}$ - Matriz de impedâncias sequenciais da linha sem transposição de condutores.

$\dot{\underline{\underline{Y}}}_{012}$ - Matriz de admitâncias sequenciais da linha sem transposição de condutores.

$\dot{\underline{\underline{Q}}}$ - Matriz dos modos de propagação das tensões.

$\dot{\underline{\underline{S}}}$ - Matriz dos modos de propagação das correntes.

$\dot{\underline{\gamma}}$ - Matriz dos constantes de propagação modais.

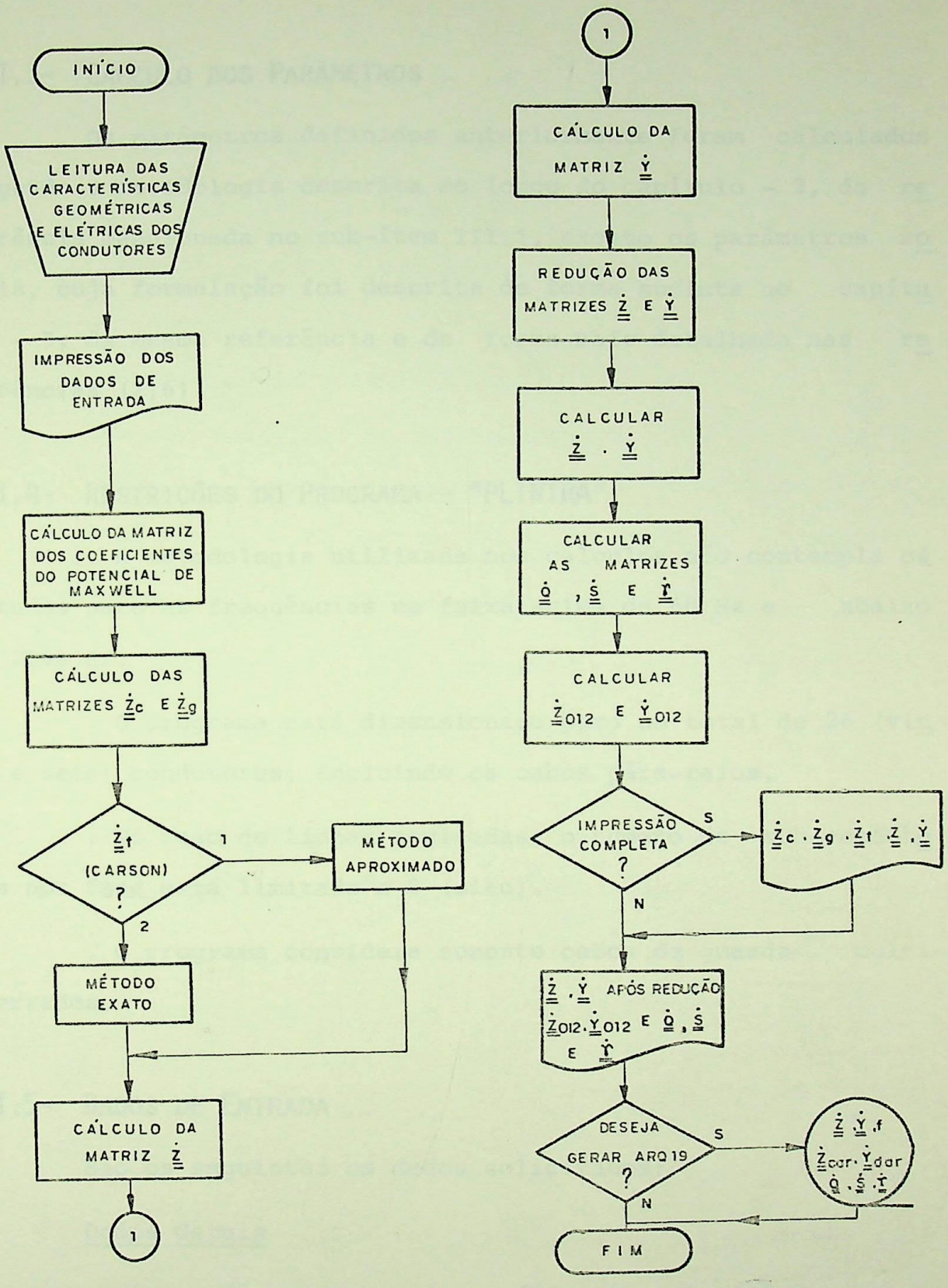


FIGURA III.1 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA - "PLINTRA" -

NOTA: A finalidade do arquivo - "ARQ19" - ficará transparente no sub-item III.8.

III.3- Cálculo dos Parâmetros

Os parâmetros definidos anteriormente foram calculados segundo a metodologia descrita ao longo do capítulo - 2, da referência mencionada no sub-ítem III.1, exceto os parâmetros modais, cuja formulação foi descrita de forma sucinta no capítulo - 3, da mesma referência e de forma mais detalhada nas referências (2,6).

III.4- Restrições do Programa - "PLINTRA"

. A metodologia utilizada nos cálculos não contempla os estudos para as frequências na faixa acima de 60 Hz e abaixo de 2000 Hz.

. O programa está dimensionado para um total de 26 (vinte e seis) condutores, incluindo os cabos pára-raios.

. No caso de linhas geminadas, o número de sub-condutores por fase está limitado a 8 (oito).

. O programa considera somente cabos de guarda multi-aterrados.

III.5- Dados de Entrada

São os seguintes os dados solicitados:

Dados Gerais

- Número de conjuntos de condutores, entendido como conjunto de condutores cada uma das fases dos circuitos que constituem o sistema, podendo cada um desses conjuntos ser constituído por N Sub-Condutores.

- Número de cabos pára-raios.
- Frequência do sistema [Hz].
- Resistividade do solo [.m].
- Temperatura de operação da linha [°C].

Dados Relativos à Geometria da Linha

- Coordenadas dos condutores [m]: no caso de linhas geminadas deverão ser fornecidas as coordenadas do centro geométrico de cada fase (conjunto de condutores).
- Número de sub-condutores por fase.
- Distância entre sub-condutores de uma mesma fase [m].
- Flecha para o vão típico em [m].

Dados dos Cabos Condutores e Pára-Raios

- Material do cabo, conforme tabela abaixo:

  1. Cobre recozido
  2. Cobre têmpera dura
  3. Alumínio têmpera dura
  4. Aço galvanizado

- Resistência CC a 25°C [ohm/km].
- Raio externo [m].
- Raio médio geométrico de cada sub-condutor [m].
- Raio de filamento da última camada [m].
- Número de filamentos da última camada.

De realçar que as fases (conjuntos de condutores) deverão ser numeradas de cima para baixo e da esquerda para a direita, deixando-se os pára-raios para serem numerados por último, obedecendo-se o mesmo critério.

III.6- Arquivo de Dados - ARQ05

Devido ao fato do programa, na sua versão original, ser conversacional, a alternativa de executá-lo via arquivo de dados torna alguns dados de entrada redundantes para efeito de montagem deste arquivo, conforme será observado a seguir.

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
                                                                        LINHA
X                                                                         1
X                                                                         2
XX.                                                                       3
XXXX.                                                                     4
XX.                                                                       5
'*'                                                                       6
                                   CAMPOS
       -1-           -2-           -3-          -4-           -5-
   -.XXXXE+XX    .XXXXXE+XX       X         .XXE+XX     .XXXXXE+XX         7
    .XXXXE+XX    .XXXXXE+XX       X         .XXE+XX     .XXXXXE+XX         8
    .XXXXE+XX    .XXXXXE+XX       X         .XXE+XX     .XXXXXE+XX         9
'*'                                                                      10
                  CAMPOS
       -1-           -2-           -3-
   -.XXXXE+XX    .XXXXXE+XX    .XXXXXE+XX                                 11
    .XXXXE+XX    .XXXXXE+XX    .XXXXXE+XX                                 12
'*'                                                                      13
'*'                                                                      14
                                   CAMPOS
   -1-       -2-           -3-           -4-           -5-          -6-
    X    .XXXXXE+XX    .XXXXXXE+XX   .XXXXXXE+XX   .XXXXXXE+XX    XX   15
'*'                                                                      16
'*'                                                                      17
                                   CAMPOS
   -1-       -2-           -3-           -4-           -5-          -6-
    X    .XXXXXE+XX    .XXXXXXE+XX   .XXXXXXE+XX   .XXXXXXE+XX    XX   18
'*'                                                                      19
'*'                                                                      20
'*'                                                                      21
X                                                                        22
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

FIGURA III.2 - A Formatação do Arquivo - ARQ05 -

Em conformidade com a figura III.2 anterior, que apresenta a formatação do Arquivo de Dados, descreve-se a seguir o contéudo de cada linha do referido arquivo, bem como de cada campo:

- Dados Genéricos

. LINHA - 1 -

Número de conjuntos de condutores

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 2 -

Número de pára-raios

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 3 -

Frequência do sistema em [Hz]

(Variável Real - Formato livre)

. LINHA - 4 -

Resistividade do solo em [Ω.m]

(Variável Real - Formato livre)

. LINHA - 5 -

Temperatura de operação da linha [^{o}C]

(Variável Real - Formato livre)

. LINHA - 6 -

Confirmação ou não de todos os dados acima (S/N).

(Variável String - Formato livre)

NOTA: Caso seja negativa esta resposta, o programa solicitará todos os dados até então fornecidos. Opção válida somente quando da execução via terminal.

- Dados Relativos à Geometria da Linha

Nas linhas de 7 a 9 estão definidos os campos que estabelecem o lugar geométrico dos cabos condutores relativos às fases. Os campos definidos nestas linhas são lidos simultaneamente conforme a formatação indicada na figura III.2.

. CAMPO - 1 -

Distância horizontal do conjunto ao eixo de referência [m].
(Variável Real - E1Ø.4)

. CAMPO - 2 -

Altura do conjunto na estrutura em relação a cota "zero" da mesma [m]
(Variável Real - E1Ø.5)

. CAMPO - 3 -

Número de sub-condutores por fase.
(Variável Inteira - I1)

. CAMPO - 4 -

Distância entre os condutores de um mesmo conjunto [m].
(Variável Real - E7.2)

. CAMPO - 5 -

Flecha para o vão básico típico [m].
(Variável Real - E1Ø.5)

NOTA: Este último dado se faz necessário para efeito de correção da altura do conjunto de condutores considerado (condutores de fase e pára-raios), relativo à cota "zero" da estrutura.

. LINHA - 10 -

Idêntica à linha - 6, entretanto o programa solicitará apenas estes últimos dados fornecidos (CAMPOS - 1 a 5). Facilidade disponível somente na versão conversacional. Na versão não convencional é obrigatório que este campo seja preenchido com "S".

Os campos 1 a 3, linhas 11 e 12, referem-se à disposição geométrica dos condutores relativos aos dados dos pará-raios. Da mesma forma, estes campos são lidos simultaneamente, conforme formatação descrita na figura já referida anteriormente.

. CAMPO - 1 -

Idem, CAMPO - 1 das linhas 7 a 9.

. CAMPO - 2 -

Idem, CAMPO - 2 das linhas 7 a 9.

. CAMPO - 3 -

Idem, CAMPO - 5 das linhas 7 a 9.

. LINHA - 13 -

Idem, LINHA - 10, porém o programa solicitará apenas o conteú do dos CAMPOS - 1 a 3 das linhas 11 e 12.

- Dados Relativos à Especificação dos Cabos

. LINHA - 14 -

Confirmação, ou não, relativa à igualdade do tipo de material empregado no conjunto de condutores de fase, quando houver mais de um circuito (S/N).

(Variável String - Formato livre)

Os campos - 1 a 6, linha - 15, especificam as grandezas que caracterizam os conjuntos de condutores relativos às fases. Entretanto, caso seja negativa a resposta constante na linha - 14, os conjuntos de condutores de fase devem ser especifica dos individualmente, conforme formatação constante na figura III.2.

. CAMPO - 1 -

Tipo de material que constitui o cabo:

1 - Cobre recozido

2 - Cobre Têmpera Dura

3 - Alumínio Têmpera Dura

4 - Aço Galvanizado

(Variável Inteira - I1)

. CAMPO - 2 -

Resistência CC a 25°C [Ω/km]

(Variável Real - E1Ø.5)

. CAMPO - 3 -

Raio externo do cabo [m]

(Variável Real - E11.6)

. CAMPO - 4 -

Raio médio geométrico do cabo [m]

(Variável Real - E11.6)

. CAMPO - 5 -

Raio do filamento da última camada do cabo [m]

(Variável Real - E11.6)

. CAMPO - 6 -

Número de filamentos da última camada do cabo

(Variável Inteira - I2)

NOTA: O preenchimento destes dois últimos campos torna-se obrigatório para efeito de cálculo dos parâmetros para as altas frequências (f > 2000 Hz).

. LINHA - 16 -

Idem, LINHA - 13, contudo o programa solicitará apenas o conteúdo dos CAMPOS - 1 a 6 da linha 15.

. LINHA - 17 -

Idem, LINHA - 14, entretanto o conjunto de condutores é o correspondente aos cabos pára-raios (S/N).

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 18 -

Os campos - 1 a 6, são idênticos aos campos - 1 a 6 da linha - 15, respectivamente. Entretanto, convém lembrar que os respectivos significados são relativos à caracterização dos cabos pára-raios. O mesmo procedimento, conforme comentado anteriormente, deve ser adotado, uma vez que a variável da linha - 17 possua uma resposta negativa.

. LINHA - 19 -

Idem, LINHA - 16, porém o programa solicitará os dados pertinentes aos campos - 1 a 6 da linha - 18.

. LINHA - 20 -

Opção para impressão parcial ou total das seguintes matrizes:

- Impedâncias longitudinais da linha.
- Admitâncias transversais da linha.

OPÇÃO	IMPRESSÃO
'S'	Matrizes Reduzidas
'N'	Matrizes Completas e Reduzidas

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 21 -

Opção para gerar o arquivo em disco - ARQ19 - em código binário, cujo conteúdo está definido na figura III.1, com vistas a utilização posterior.

OPÇÃO	RESULTADO
'S'	Cria-se o arquivo - ARQ19 -
'N'	Termina-se o processamento

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 22 -

Opção de processamento da matriz de impedâncias devido à disposição geométrica dos condutores face ao retorno imperfeito das correntes (Correção de Carson):

OPÇÃO	MÉTODO
'1'	Aproximado
'2'	Exato

(Variável Inteira - Formato livre)

III.7- Execução do Programa - "PLINTRA"

Para a execução do programa no ambiente - CYBER/930, devem adotar-se os seguintes procedimentos:

- A nível do diretório de cada usuário e com o intuito de fazer o controle do "carro" da impressora obedecer à formatação desejada deve utilizar-se, antes da execução do programa, a seguinte instrução:

```
/SETFA $LOCAL.TAPE4 FC=LIST
```

Portanto, o arquivo de saída na impressora é o TAPE4. Por outro lado, a fim de acompanhar o estágio do processamento durante a execução, uma vez que o programa "PLINTRA" permite sua execução via terminal (a despeito de ser desaconselhável, face ao número elevado de dados de entrada), define-se o seguinte arquivo:

```
/REQT $LOCAL. TAPE6
```

- Pelo exposto anteriormente, se for desejável a execução do programa via arquivo de dados em disco - ARQØ5, conforme a formatação já definida, e ainda, gerar o arquivo - ARQ19, ao executar o programa, tais arquivos devem ser definidos no próprio comando de execução do programa, através da instrução:

```
/EXET PLINTRA 'TAPE5=ARQØ5 TAPE19=ARQ19'
```

Apresenta-se a seguir, para ilustrar o exemplo, o ar

quivo de dados - ARQØ5, cuja formatação está de acordo com a descrição do sub-ítem anterior. Por comodidade, para efeito de uma melhor localização das colunas dos campos definidos, acrescentou-se duas linhas adicionais, uma no início e outra no final do referido arquivo, numeradas de 1 (um) 70 (setenta), sendo que tais linhas não devem fazer parte do mesmo.

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
                                                                          LINHA
3                                                                           1
2                                                                           2
60.                                                                         3
500.                                                                        4
75.                                                                         5
'S'                                                                         6
   -.1515E+02    .32700E+02      4      .45E+00    .18700E+02              7
    .0000E+00    .32700E+02      4      .45E+00    .18700E+02              8
    .1515E+02    .32700E+02      4      .45E+00    .18700E+02              9
'S'                                                                        10
   -.1250E+02    .42900E+02    .12600E+02                                  11
    .1250E+02    .42900E+02    .12600E+02                                  12
'S'                                                                        13
'S'                                                                        14
    3   .04580E+00     .017082E+00    .013500E+00    .001949E+00   20      15
'S'                                                                        16
'S'                                                                        17
    4   .36590E+00     .015420E+00    .002655E+00    .006285E+00   12      18
'S'                                                                        19
'N'                                                                        20
'S'                                                                        21
2                                                                          22
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

FIGURA III.3 - O ARQUIVO - ARQØ5 - NO AMBIENTE CYBER/930.

III.8- Saída de Dados

Além do arquivo - ARQ19 - descrito no parágrafo seguinte, no capítulo - 2 da referência mencionada no sub-ítem III.1 apresenta-se uma saída típica do programa que corresponde, exatamente, aos resultados obtidos com o arquivo de dados - ARQØ5 - mostrado na figura III.3.

O arquivo de dados - ARQ19 - contém os parâmetros relevantes da linha de transmissão que servem como dados de entrada para os programas a serem descritos logo em seguida.

A N E X O - IV

MANUAL DO PROGRAMA - CLINTRA

(COMPENSAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

A N E X O - IV

MANUAL DO PROGRAMA - CLINTRA

(COMPENSAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

IV.1- INTRODUÇÃO

O presente manual de utilização do programa "CLINTRA" (Compensação de Linhas de Transmissão) têm como objetivo principal descrever a montagem dos arquivos de dados que permitem simular as linhas compensadas, bem como apresentar a forma de execução do referido programa, que permite calcular as tensões e correntes, em regime permanente, ao longo de linhas aéreas de transmissão, nas seguintes circunstâncias:

1º) Linhas sem compensação
- Sem transposição de condutores
- Com transposição de condutores
  (dois esquemas/1 ciclo de transposição)

2º) Linhas com compensação
- Shunt (três configurações)
- Série (três configurações)
- Mista (cinco configurações)
- Meia Onda (três configurações)
- Potência Característica (cinco configurações)

Desta forma, permite-se avaliar alguns parâmetros de desempenho da linha de transmissão, tais como desequilíbrios, regulação, rendimento, parâmetros das compensações, entre outros.

A consecução de tais estudos só é possível se observadas as seguintes condições iniciais:

a - tensões fixadas no terminal receptor e a carga conhecida no mesmo terminal, representada por impedâncias ou admitâncias constantes.

b - tensões fixadas no terminal emissor e a carga conhecida no terminal receptor, representada por impedâncias ou admitâncias constantes.

c - ter disponível o arquivo - ARQ19 - criado pelo programa - "PLINTRA", contendo os parâmetros relevantes da linha. De realçar que o referido arquivo é gerado em código binário e a rotina de leitura deste arquivo, que integra o programa - "CLINTRA", já leva tal aspecto em consideração.

IV.2- FLUXOGRAMA DO PROGRAMA - "CLINTRA"

O programa "CLINTRA" foi estruturado de tal forma a permitir realizar, além dos estudos já citados, estudos dos perfis das tensões e correntes, em componentes de fase e em componentes simétricas, ao longo de toda a linha de transmissão, considerando qualquer condição de carga, modelada como uma matriz de impedâncias ou admitâncias constantes, desde que enquadradas numa das condições iniciais descritas anteriormente.

Finalmente, apresenta-se na figura IV.1 o fluxograma da unidade principal do programa - "CLINTRA".

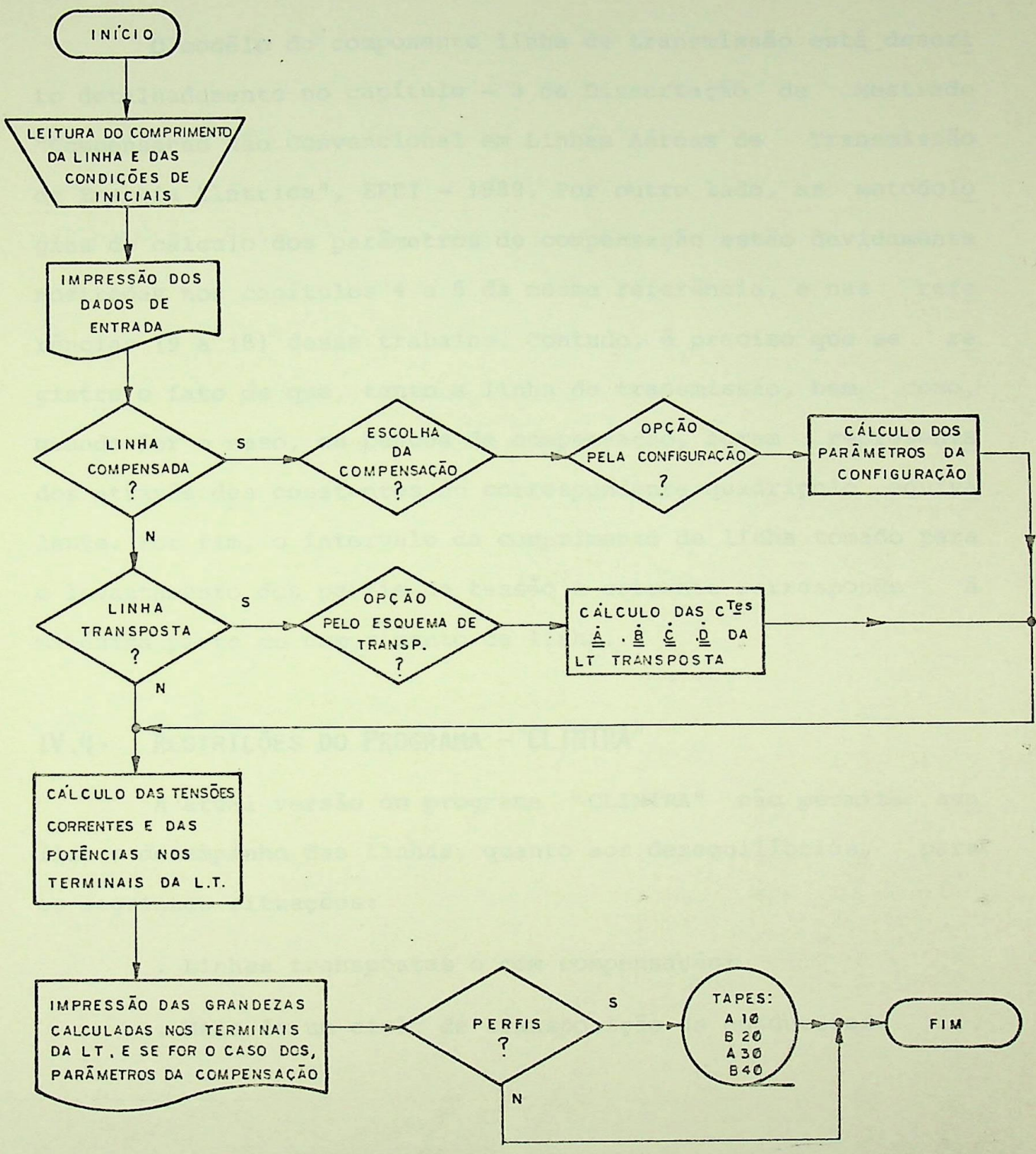


FIGURA IV.1 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA - "CLINTRA" -

IV.3- Cálculo das Tensões e Correntes

O modêlo do componente linha de transmissão está descrito detalhadamente no capítulo - 3 da Dissertação de Mestrado "Compensação Não Convencional em Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica", EFEI - 1989. Por outro lado, as metodologias de cálculo dos parâmetros de compensação estão devidamente mostradas nos capítulos 4 e 5 da mesma referência, e nas referências (9 a 18) desse trabalho. Contudo, é preciso que se registre o fato de que, tanto a linha de transmissão, bem como, quando for o caso, os bancos de compensação, foram representados através das constantes do correspondente quadripolo equivalente. Por fim, o intervalo de comprimento de linha tomado para o levantamento dos perfis de tensão e corrente corresponde à milésima parte do comprimento da linha.

IV.4- Restrições do Programa -"CLINTRA"

A atual versão do programa "CLINTRA" não permite avaliar o desempenho das linhas, quanto aos desequilíbrios, para as seguintes situações:

. Linhas transpostas e com compensação;

. Mais de um ciclo de transposição de condutores.

IV.5- Dados de Entrada / Arquivo de Dados - ARQØ2

Alguns dados solicitados sugerem a possibilidade de se realizar outros estudos, tendo em vista os objetivos acadêmicos inseridos no programa. No entanto, a apresentação dos mesmos ficará restrita aos objetivos já definidos. Assim sendo, apresenta-se, a seguir, a descrição dos arquivos de dados indispensáveis para simular, inicialmente, as linhas sem compensação, e posteriormente, as linhas compensadas.

Assim sendo, a figura IV.2 mostra a formatação do arquivo - ARQØ2 - com vistas a simular linhas não compensadas.

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                              LINHA
XXXX.                                                           1
'S'                                                             2
XXXX.                                                           3
'*'                                                             4
              CAMPOS
         -1-           -2-
    .XXXXXXXE+XX    +XXX.X                                      5
    .XXXXXXXE+XX    +XXX.X                                      6
    .XXXXXXXE+XX    +XXX.X                                      7
'S'                                                             8
'*'                                                             9
              CAMPOS
         -1-             -2-
    .XXXXXXXE+XX    +.XXXXXXE+XX                                10
    .XXXXXXXE+XX    +.XXXXXXE+XX                                11
    .XXXXXXXE+XX    +.XXXXXXE+XX                                12
X                                                               13
'S'                                                             14
'*'                                                             15
X                                                               16
'*'                                                             17
X                                                               18
'*'                                                             19
X                                                               20
'S'                                                             21
'S'                                                             22
'N'                                                             23
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

FIGURA IV.2 - A Formatação do Arquivo - ARQØ2 - (Linhas não Compensadas).

. LINHA - 1 -

Comprimento da linha

(Variável Real - Formato livre)

. LINHA - 2 -

Resposta quanto a possibilidade de se conhecer as tensões e correntes num ponto intermediário da linha, (S/N).

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 3 -

Caso a leitura da variável da linha anterior possua uma resposta afirmativa, esta linha define a distância, a partir do terminal de referência a ser adotado, para a qual pretende-se conhecer os perfis de tensão e corrente. Caso contrário, esta linha pode não existir.

(Variável Real - Formato livre)

. LINHA - 4 -

Define o terminal da linha adotado para referência, isto é, aquele para o qual as tensões são fixadas em função da condição inicial adotada.

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 5 a 7 / CAMPOS - 1 e 2

Definem o módulo e a fase, respectivamente, da tensão (fase-neutro) aplicada ao terminal de referência.

(Variáveis do tipo Real - E 12.7 e F 6.1, respectivamente)

. LINHA - 8 -

Confirmação dos dados fornecidos ao programa, linhas - 1 a 7 - (S/N).

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 9 -

Informa como a carga está modelada, se através de impedâncias ou admitâncias constantes, (Z/Y).

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 10 a 12 / CAMPOS - 1 e 2

Estes campos definem, respectivamente, as partes real e imaginária, por fase, da carga modelada conforme as opções apresentadas na linha - 9.

(Variáveis do tipo Real - E 12.7 e E 12.6, respectivamente)

. LINHA - 13 -

Corresponde a um "flag" que define a condição de carga imposta ao terminal receptor da linha, a saber:

LINHA - 9 -	LINHA - 13 -	SIGNIFICADO
	0	Vazio
Y	1	Carga
	3	Reg. Característico
ou,		
	2	Curto-circuito
Z	1	Carga
	3	Reg. Característico

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 14 -

Idem, linha - 8 -, exceto se a resposta for negativa, o programa solicitará os dados correspondentes as linhas - 9 a 13, (S/N).

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 15 -

Opção para plotagem dos perfis de tensões e correntes ao longo da linha, (S/N). Se afirmativo, é obrigatória a existência do campo seguinte.

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 16 -

Define o circuito a ser estudado, isto é, quando houver dois circuitos numa mesma tôrre, a dimensão das matrizes dos parâmetros relevantes da linha é (6 x 6). Assim sendo, fica estabelecido para a rotina de leitura dos parâmetros qual o circuito em estudo, (1/2).

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 17 -

Idem, linha - 15 -, exceto pela plotagem do diagrama polar, (S/N).

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 18 -

Idem, linha - 16 -, (1/2).

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 19 -

Estabelece se o estudo contempla transposição de condutores, (S/N). Se afirmativo, é obrigatória a existência do campo seguinte.

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 20 -

Define o esquema de transposição de condutores adotado, conforme as opções mostrados na Figura IV.3, (1/2).

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 21 e 22 -

Idem, linha - 14. No entanto, entre as leituras das linhas 21 e 22 o usuário confere todos os dados de entrada. Se a variável da linha - 21 - possuir uma resposta negativa o programa solicitará, novamente, o preenchimento das linhas 15 a 20. Por outro lado, se a resposta for negativa para a variável da linha - 21 - o programa reiniciará a solicitação de todos os dados, desde a primeira linha do arquivo, (S/N).

(Variável String - Formato livre).

. LINHA - 23 -

Estabelece se o estudo em questão pretende simular alguma compensação, (S/N).

(Variável String - Formato livre)

NOTAS:

1ª) Na simulação de linhas não compensadas, a variável da linha - 23 - deve conter, obrigatoriamente, uma resposta negativa.

2ª) Na simulação das linhas sem compensação e sem transposição de condutores, são dispensáveis as seguintes linhas: 3, 18 e 20. Nestas circunstâncias, as variáveis das linhas 2, 17 e 19 devem possuir uma resposta negativa.

3ª) No entanto, considerando-se as linhas sem compensação, porém com transposições de condutores, as linhas 3 e 20 são indispensáveis. A linha - 3 - servirá para localizar a primeira estrutura de transposição, a contar do terminal de referência adotado, em função do esquema de transposição definido pela linha - 20, figura IV.3.

A seguir, apresenta-se a figura - IV.3 que mostra os esquemas de transposição de condutores para uma linha trifásica a circuito simples.

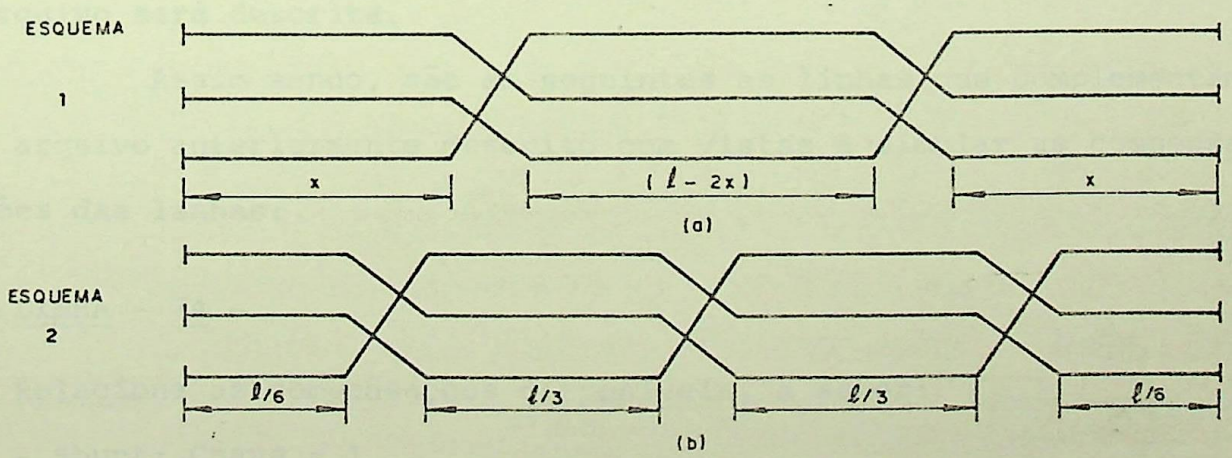


FIGURA IV.3 - ESQUEMAS DE TRANSPOSIÇÃO DE CONDUTORES IMPLEMENTADOS NO PROGRAMA - CLINTRA -

De realçar que, na figura anterior, a localização da primeira tôrre de transposição (estabelecida na linha - 3 -) pré-define a localização das demais estruturas destinadas a transpor os condutores.

Por outro lado, caso o estudo desejado corresponda a uma das alternativas de compensação de linhas, a resposta à variável da linha - 23 - deve ser, obrigatoriamente, afirmativa. Nestas circunstâncias, as linhas 17 e 19 devem conter, obrigatóriamente, uma reposta negativa, consequentemente, as linhas 18 e 20 deixam de existir. Já a existência da linha - 3 - fica condicionada ao estudo de alguma configuração que contempla compensação intermediária. Neste caso, a variável da linha - 2 - deve possuir, portanto, uma resposta afirmativa.

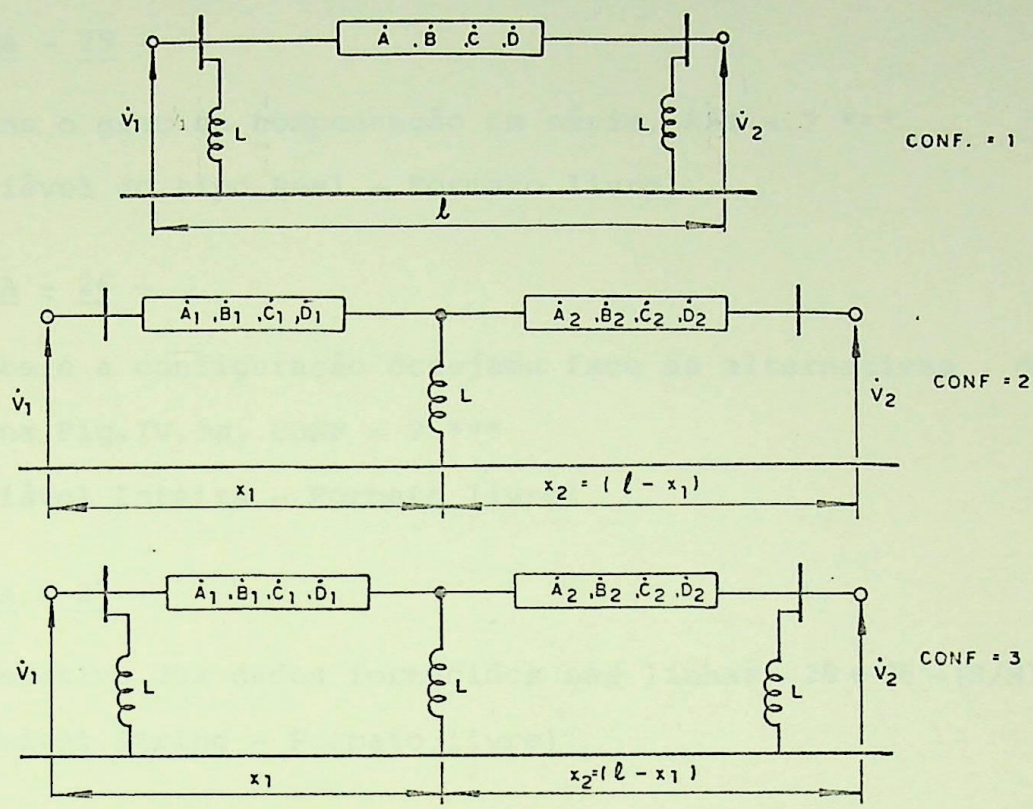
Por uma questão de simplicidade, a apresentação dos arquivos que permitem estudar as compensações das linhas dar-se-á segundo a ordenação prescrita no sub-item IV.1, deste manual. E ainda como a entrada de dados de todos os estudos de simulação que podem ser efetuados com o programa - "CLINTRA" é, rigorosamente, igual até a linha - 23 -, apenas a complementação de tal arquivo será descrita.

Assim sendo, são as seguintes as linhas que complementam o arquivo anteriormente descrito com vistas a simular as compensações das linhas:

. LINHA - 24 -

Relaciona as compensações disponíveis, a saber:

- Shunt: Chave = 1



(A)

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                              LINHA
1                                                               24
XXX.                                                            25
X                                                               26
'*'                                                             27
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

(B)

FIGURA IV.4 - (A) ESQUEMAS PARA A COMPENSAÇÃO SHUNT

(B) COMPLEMENTO DO ARQUIVO - ARQØ2/SHUNT

- Compensação Série: Chave = 2

. LINHA - 25 -

Define o grau da compensação em série, Ks% = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 26 -

Estabele a configuração desejada face às alternativas constantes na Fig.IV.5a, CONF = ? ***

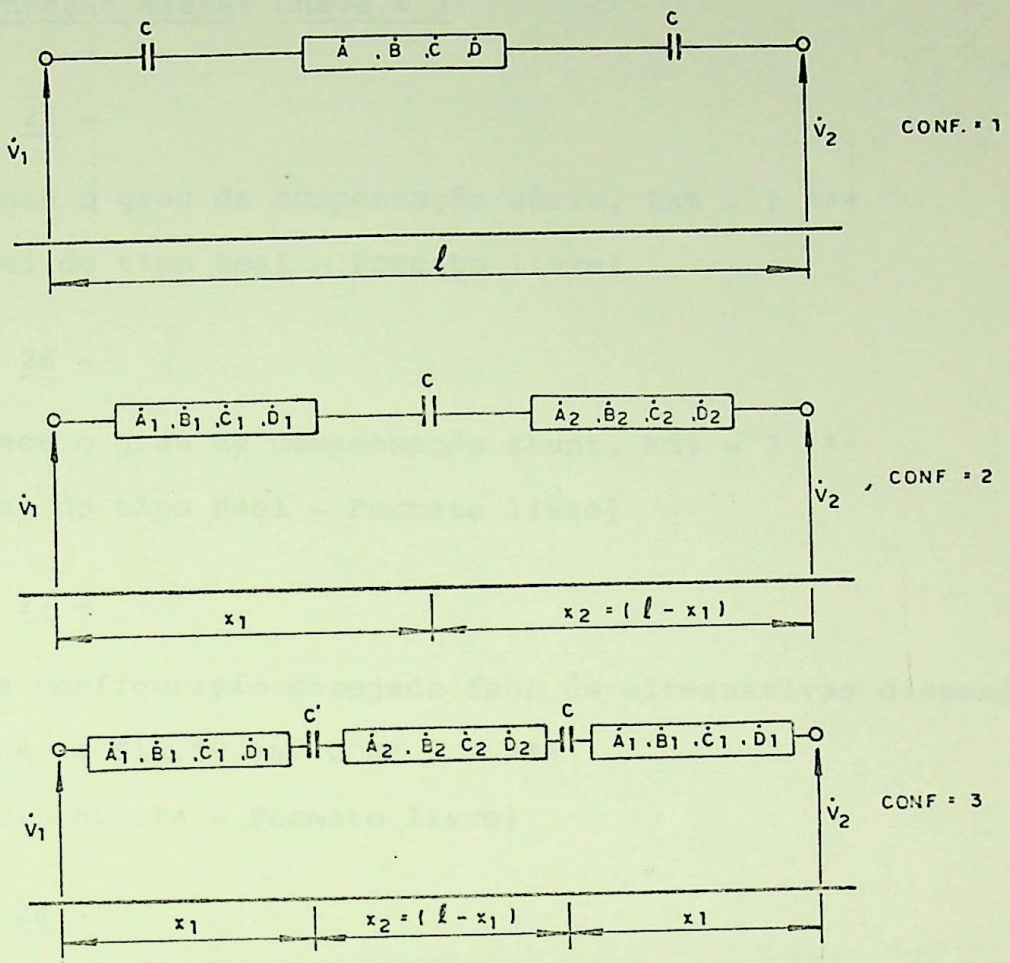
(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 27 -

Reiterativo dos dados fornecidos nas linhas - 25 e 26 - (S/N) ***

(Variável String - Formato livre)

As configurações disponíveis e a formatação complementar do arquivo - ARQØ2 - que permite estudar a compensação em série, apresenta-se na figura a seguir:



(A)

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                                LINHA
2                                                                 24
XXX.                                                              25
X                                                                 26
***                                                               27
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

(B)

FIGURA 4.5 - (A) ESQUEMAS PARA A COMPENSAÇÃO SÉRIE
(B) COMPLEMENTO DO ARQUIVO - ARQØ2/SÉRIE

- Compensação Mista: Chave = 3

. LINHA - 25 -

Estabelece o grau da compensação série, Ks% = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 26 -

Estabelece o grau da compensação shunt, Kd% = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 27 -

Define a configuração desejada face às alternativas disponíveis mostradas na Fig.IV.6a, CONF = ? ***

(Variável Inteira - Formato livre)

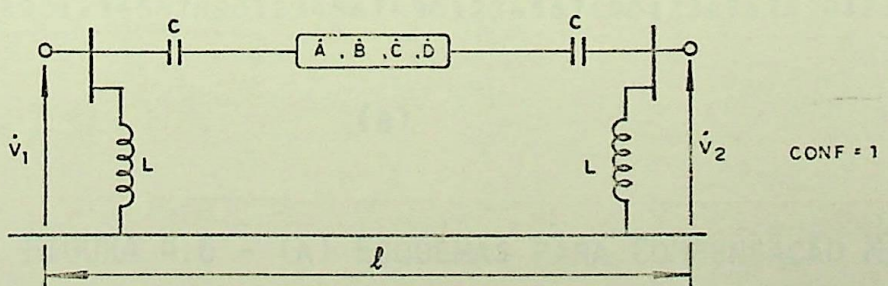
. LINHA - 28 -

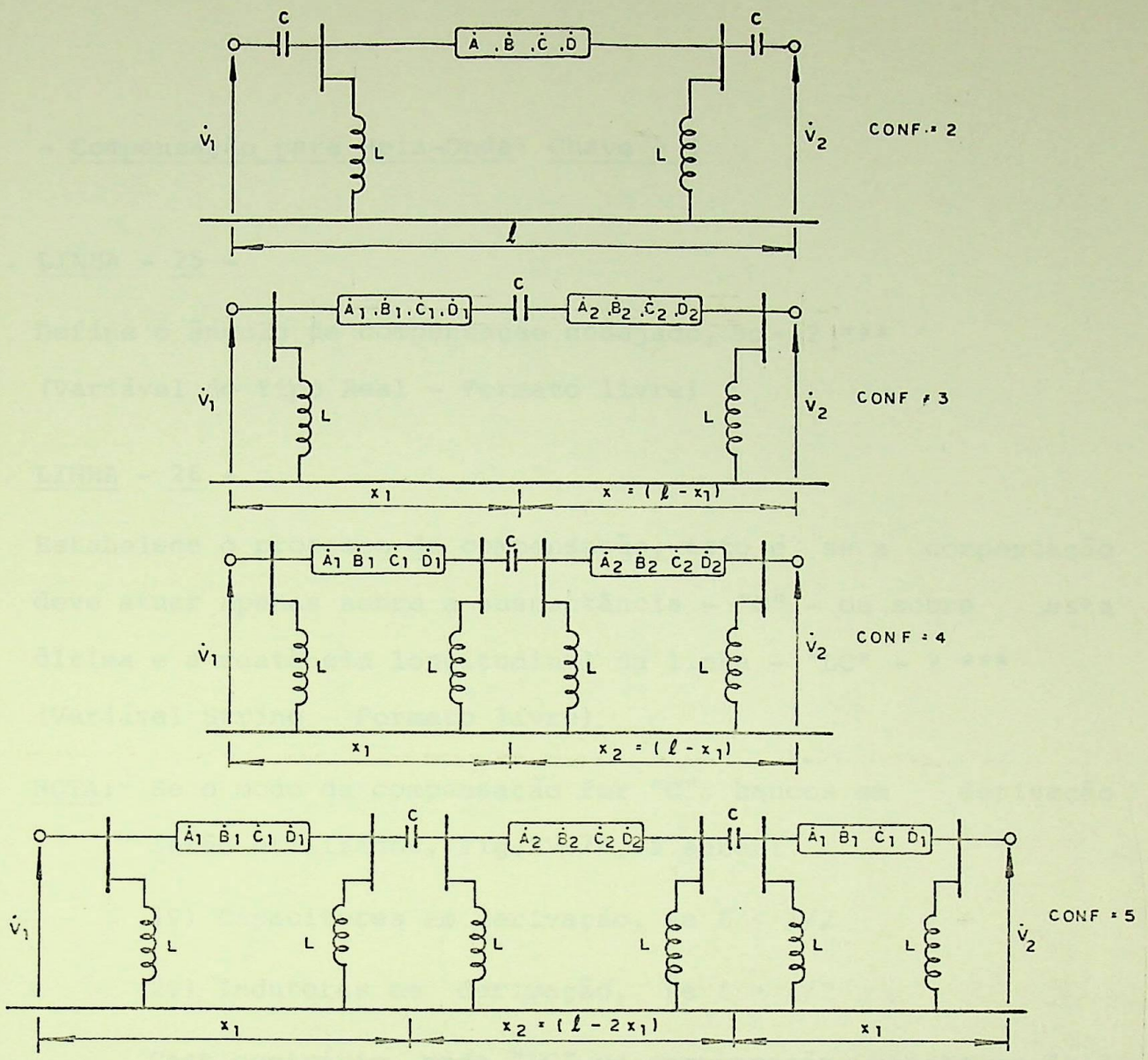
Reiterativo das instruções constantes nas linhas - 25 a 27 -

(S/N) ***

(Variável String - Formato livre)

Os esquemas disponíveis para simulação e a formatação necessária do arquivo - ARQØ2 - que possibilita estudar a compensação mista em linhas, estão descritos na figura a seguir:





(A)

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                              LINHA
3                                                               24
XXX.                                                            25
XXX.                                                            26
X                                                               27
'*'                                                             28
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

(B)

FIGURA 4.6 - (A) ESQUEMAS PARA COMPENSAÇÃO MISTA

(B) COMPLEMENTO DO ARQUIVO - ARQØ2/MISTA

- Compensação para Meia-Onda: Chave = 4

. LINHA - 25 -

Define o ângulo de compensação desejado, θc = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 26 -

Estabelece o processo de compensação, isto é, se a compensação deve atuar apenas sobre a susceptância - "C" - ou sobre esta última e a reatância longitudinal da linha - "LC" - ? ***

(Variável String - Formato livre)

NOTA: Se o modo da compensação for "C", bancos em derivação serão utilizados, Fig.IV.7a, a saber:

1º) Capacitores em derivação, se $\ell < \lambda/2$

2º) Indutores em derivação, se $\ell > \lambda/2$

Caso contrário, modo "LC" de compensação, bancos em "Pi" e em "T" estarão disponíveis, Figuras IV.7b e c, respectivamente.

. LINHA - 27 -

Especifica a configuração utilizada no estudo, conforme as alternativas descritas na Figura IV.8, CONF = ? ***

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 28 -

Caso o modo de compensação seja "LC", linha - 26 -, a presente linha deve conter a variável: "II" ou "T" - ? ***

(Variável String - Formato livre)

. LINHA - 29 -

Reiterativo das informações constantes nas linhas - 25 a 28 - (S/N) ***

(Variável String - Formato livre)

As figuras referidas nas linhas 26 e 27 apresentam-se a seguir:

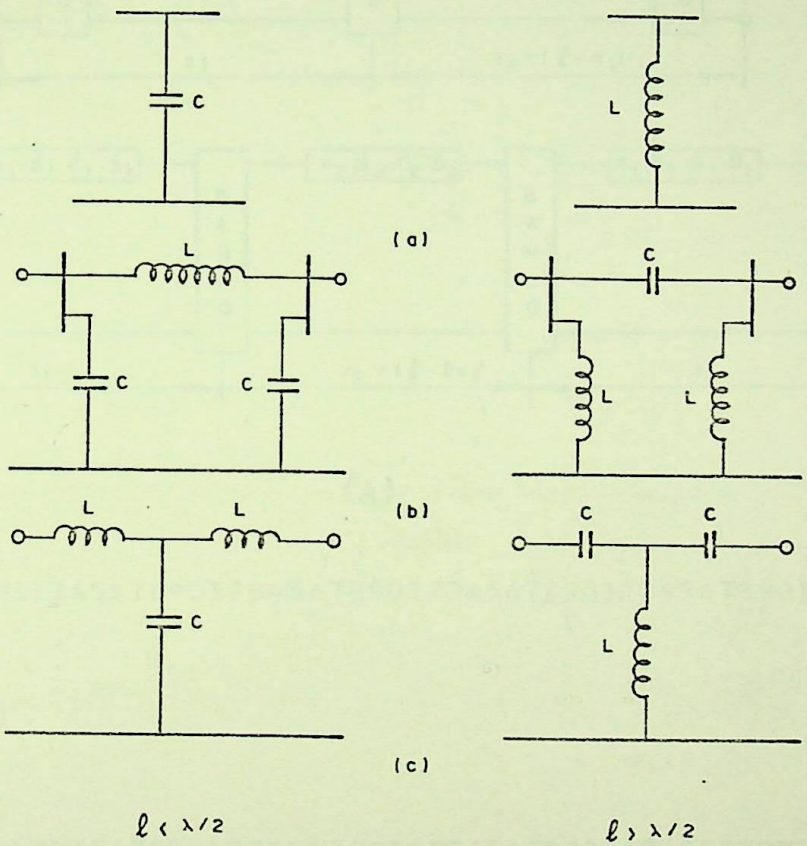
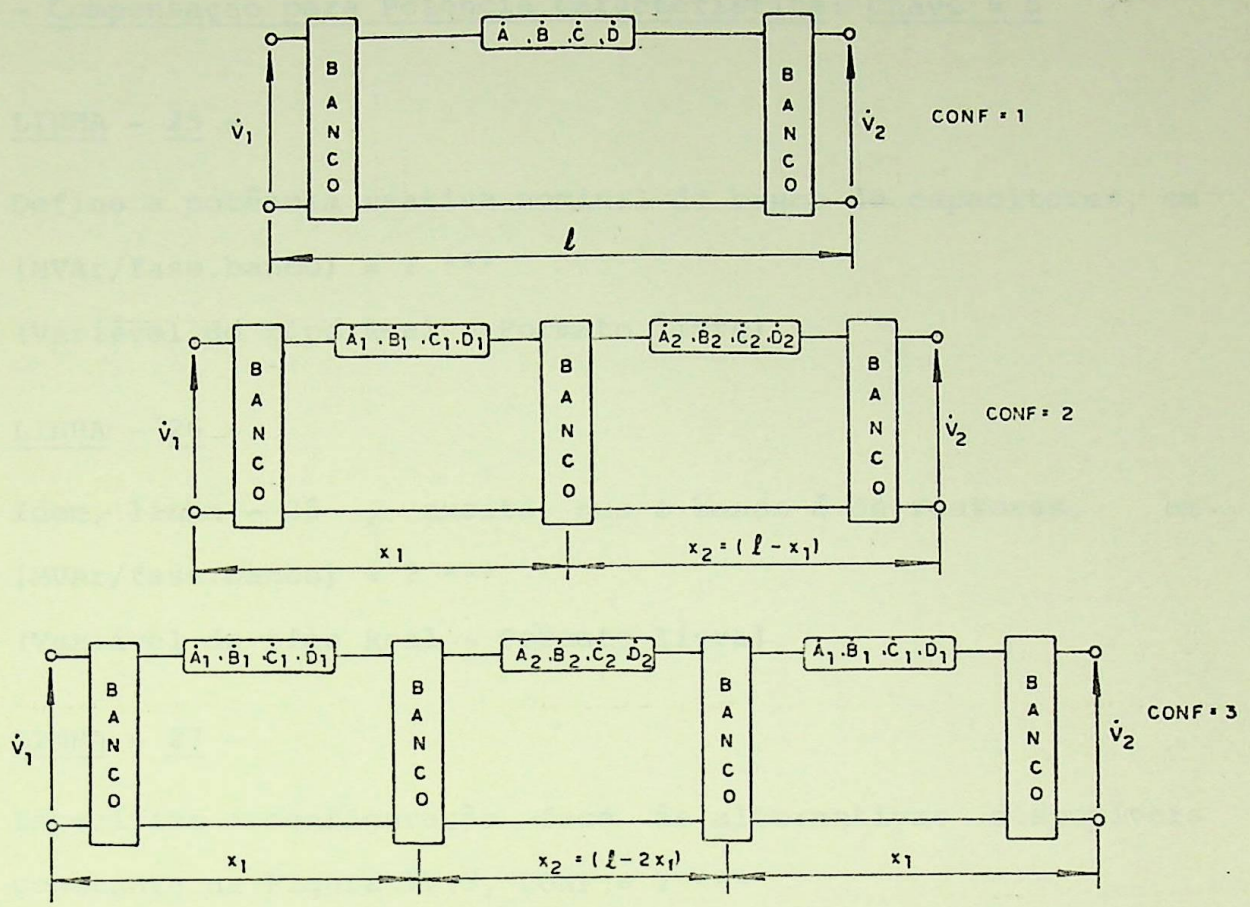


FIGURA IV.7 - (A) MODO "C" DE COMPENSAÇÃO: BANCOS EM DERIVAÇÃO.

(B) MODO "LC" DE COMPENSAÇÃO: BANCOS EM "PI"

(C) MODO "LC" DE COMPENSAÇÃO: BANCOS EM "T"



(A)

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                              LINHA
4                                                               24
XXX.                                                            25
'*X'                                                            26
X                                                               27
'*X'                                                            28
'*'                                                             29
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

(B)

FIGURA IV.8 - (A) ESQUEMAS PARA COMPENSAÇÃO PARA MEIA-ONDA

(B) COMPLEMENTO DO ARQUIVO - ARQØ2/ MEIA-ONDA

- Compensação para Potência Característica: Chave = 5

. LINHA - 25 -

Define a potência reativa nominal do banco de capacitores, em [MVAr/fase.banco) = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 26 -

Idem, linha - 25 -, exceto que o banco é de reatores, em [MVAr/fase.banco] = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 27 -

Especifica a configuração face às alternativas disponíveis constante na Figura IV.9, CONF = ? ***

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 28 -

Determina o grau de compensação desejado, Kd [%] = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 29 -

Contém um percentual do regime característico da linha, SIL [%] = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

. LINHA - 30 -

Estabelece o fator de potência da carga: FP = ? ***

(Variável do tipo Real - Formato livre)

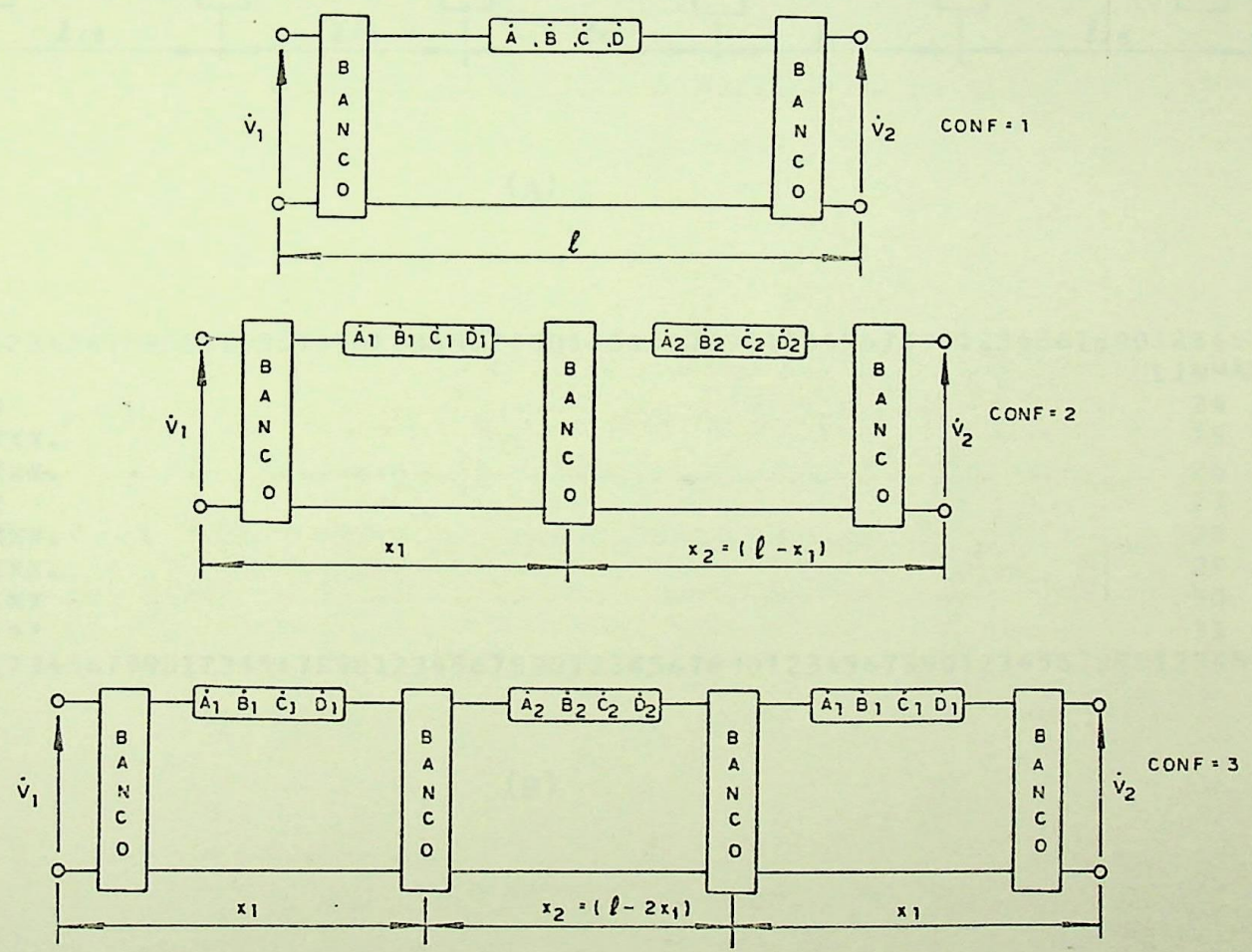
. LINHA - 31 -

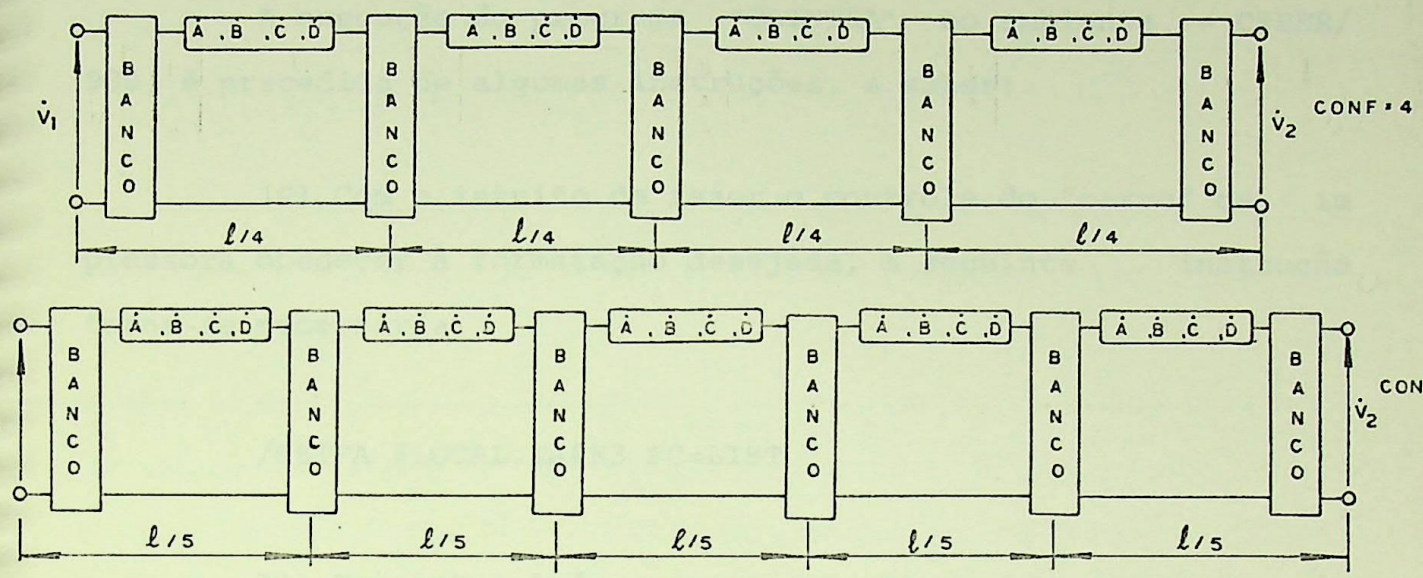
Reiterativo das informações constantes nas linhas - 25 a 30 -

(S/N) ***

(Variável String - Formato livre)

A Figura IV.9 referida anteriormente apresenta-se a seguir:





(A)

```
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                              LINHA
5                                                               24
XXX.                                                            25
XXX.                                                            26
X                                                               27
XXX.                                                            28
XXX.                                                            29
.XX                                                             30
'*'                                                             31
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

(B)

FIGURA IV.9 - (A) ESQUEMAS PARA COMPENSAÇÃO PARA POTÊNCIA CARACTERÍSTICA

(B) COMPLEMENTO DO AQUIVO - ARQØ2/SIL

IV.6- EXECUÇÃO DO PROGRAMA - "CLINTRA"

A execução do programa "CLINTRA" no ambiente - CYBER/930, é precedida de algumas instruções, a saber:

1º) Com o intuito de fazer o controle do "carro" da impressora obedecer à formatação desejada, a seguinte instrução torna-se necessária:

```
/SETFA $LOCAL.TAPE3 FC=LIST
```

2º) Por outro lado, para acompanhar o processamento via terminal, a execução do referido programa é precedida pela instrução:

```
/REQT $LOCAL.TAPE6
```

3º) Finalmente, ao executar o programa, os arquivos - ARQØ2 e ARQ19, devem ser convenientemente definidos. Assim, faz-se:

```
/EXET CLINTRA 'TAPE2=ARQØ2 TAPE19=ARQ19'
```

IV.7- SAÍDA DE DADOS

O relatório de saída é obtido através do seguinte procedimento:

/PRIF $LOCAL.TAPE3

Já os arquivos de dados contendo os perfis das tensões e correntes ao longo da linha, quando requeridos, localizam-se, respectivamente, nos arquivos temporários TAPE10 e TAPE20. As componentes sequenciais, sequências zero, positiva e negativa, estão disponíveis nos arquivos TAPE30 = tensão e TAPE40 = corrente. Caso se deseja obter posteriormente, os gráficos correspondentes, tais arquivos devem ser transformados em arquivos permanente através, por exemplo, do procedimento seguinte:

/COPF $LOCAL.TAPE10

Face à não existência do periférico traçador de gráficos de plotagem no ambiente do CYBER - 930, os arquivos referidos acima, devidamente identificados, podem ser transferidos para o disco do HP-3000, mediante solicitação, por escrito, à recepção do CPD-EFEI, para fins de plotagem. O programa para plotagem destes arquivos está descrito no ANEXO - VI.

NOTA: No estudo de compensação das linhas, as potências reativas nominais dos bancos de compensação, constantes no relatório de saída, foram dimensionados para fornecer tais potências, em cada caso, a partir da tensão nominal e da corrente correspondente à potência característica da linha.

A N E X O - V

MANUAL DO PROGRAMA - CELINTRA

(COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

A N E X O - V

MANUAL DO PROGRAMA - "CELINTRA"

(COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO)

V.1 - INTRODUÇÃO

Este manual de utilização do programa - "CELINTRA" (Compensação Estática de Linhas de Transmissão) têm como principal objetivo descrever a montagem do arquivo de dados necessário à execução do referido programa, com fins de simular linhas que utilizam a compensação estática com a finalidade de manter o valor da tensão entre fases, em certos pontos do sistema, em níveis pré-definidos, mesmo na presença de cargas desequilibradas. Uma vez conhecidas as tensões nodais resultantes, o programa permite ainda conhecer os perfis de tensões e correntes ao longo da linha compensada, além da contribuição, por fase, de cada compensador estático. Para conhecer as tensões nodais resultantes, o programa utiliza um fluxo de carga trifásico que incorpora um modelo de um compensador estático que encontra-se descrito no capítulo - 6 da Dissertação de Mestrado - "Compensação Não Convencional de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica", EFEI-1989, bem como nas referências (19 a 21) também constantes no mesmo trabalho.

V.2 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA - "CELINTRA"

No que concerne aos parâmetros da linha de transmissão, o programa - "CELINTRA" acessa o arquivo ARQ19 - criado pelo programa - "PLINTRA".

Como o programa utiliza o método de Newton-Raphson para calcular as tensões nodais, as cargas são contabilizadas nos balanços das potências ativas e reativas em cada nó do sistema. A Figura V.1 abaixo, representa o fluxograma da unidade principal do programa em análise:

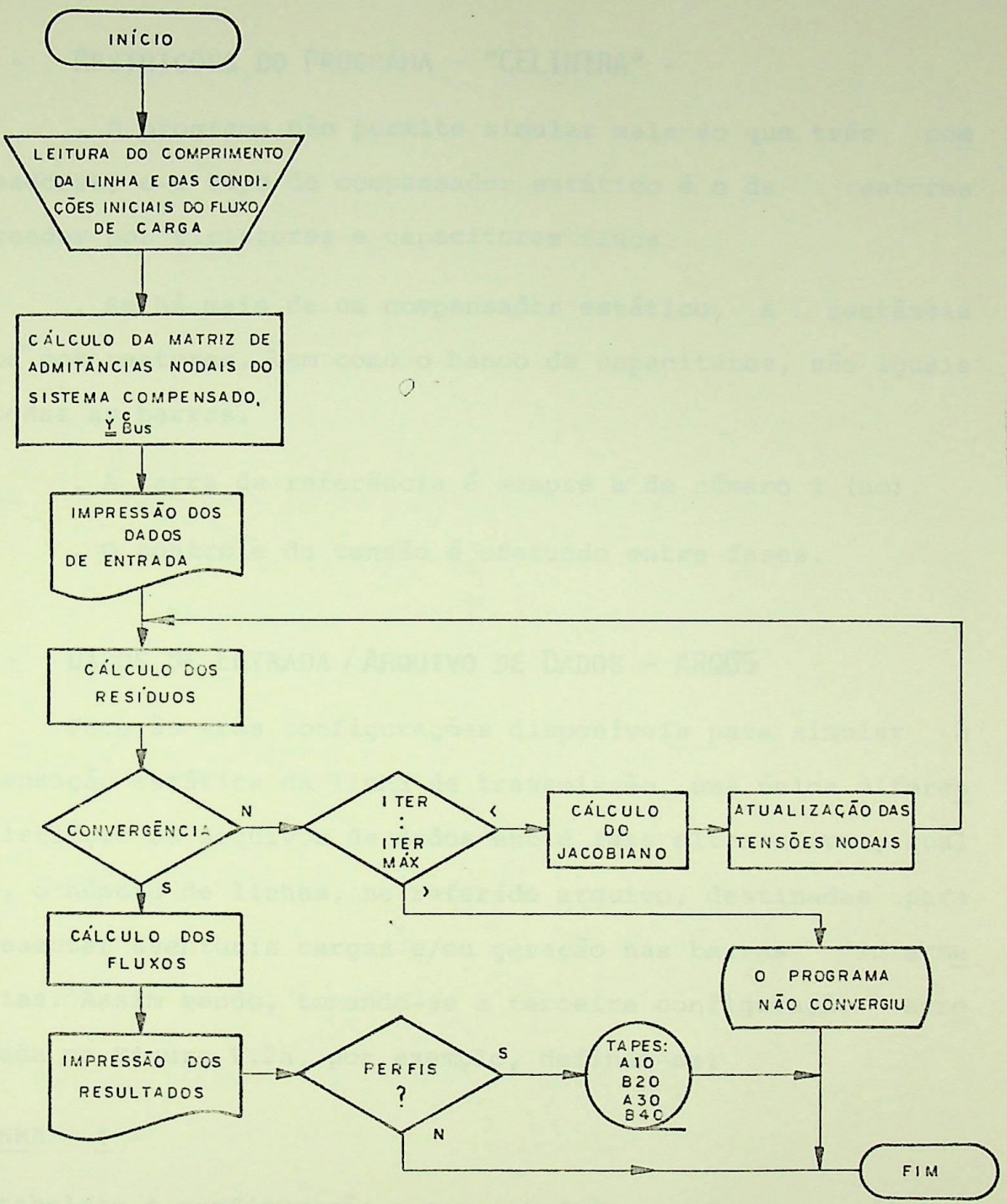


FIGURA V.1 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA - CELINTRA -

V.3 - RESTRIÇÕES DO PROGRAMA - "CELINTRA" -

. O programa não permite simular mais do que três compensadores, e o tipo de compensador estático é o de reatores chaveados por tiristores e capacitores fixos.

. Se há mais de um compensador estático, a reatância "slope" dos reatores, bem como o banco de capacitores, são iguais em todas as barras.

. A barra de referência é sempre a de número 1 (um).

. O controle da tensão é efetuado entre fases.

V.4 - DADOS DE ENTRADA / ARQUIVO DE DADOS - ARQØ5

Face às três configurações disponíveis para simular a compensação estática da linha de transmissão, uma única diferença distingue os arquivos de dados entre tais alternativas, qual seja, o número de linhas, no referido arquivo, destinadas para representar eventuais cargas e/ou geração nas barras intermediárias. Assim sendo, tomando-se a terceira configuração apresentada na Figura V.2a, por exemplo, definem-se:

. LINHA - 1 -

Estabelece a configuração a ser estudada, conforme a figura V.2a, CONF = ? ***

(Variável Inteira - Formato livre)

. LINHA - 2 -

Define o modo de leitura da contribuição de corrente do reator. Se internamente à conexão delta, OPER = 1, caso contrário, OPER = 2, OPER = ? ***

(Variável Inteira - Formato livre)

NOTA: O modo de leitura da contribuição de corrente do reator traz implicações apenas de ordem computacional.

. LINHA - 3 / CAMPOS - 1 e 2

Contém, respectivamente, o comprimento da linha e a distância entre as barras: L e X_1 = ? ***

(Variável do tipo Real - F5.Ø e F6.1, respectivamente)

NOTA: No caso de mais de um compensador estático no sistema, portanto mais de duas barras além da barra de referência, considere a definição da distância entre barras mostradas na Figura V.2a.

. LINHA - 4 / CAMPOS - 1 a 3

Definem, respectivamente, o seguinte:

1º) Modêlo da linha de transmissão: 1 - PI nominal
2 - PI equivalente

(Variável Inteira - I1)

2º) Número máximo de iterações: ITERMAX = ? ***

(Variável Inteira - I3)

3º) Tolerância desejada: TOL = ? *** (Normalmente, igual a 10^{-4})

(Variável do tipo Real - E1Ø.5)

. LINHAS - 5 a 7 / CAMPOS - 1 a 4

Definem respectivamente, os módulos e os ângulos de fase das tensões nas três fases da Barra de referência.

(Variável do tipo Real - E1Ø.5 e F6.1, respectivamente)

. LINHAS - 8 a 16 / CAMPOS - 1 a 4

Definem as potências ativa e reativa geradas (campos 1 e 2) e consumidas (campos 3 e 4), respectivamente, referentes às barras 2, 3 e 4, numeradas a partir da barra de referência, conforme a terceira configuração apresentada na Figura V.2a.
(Variáveis do tipo Real - 4 x E11.5)

. LINHA - 17 / CAMPOS - 1 a 3

Estabelecem, respectivamente, a reatância "slope" dos reatores, a potência nominal dos capacitores conectados às barras e, finalmente, um controle percentual da tensão de referência. Quando o sistema tiver mais de um compensador, estes últimos serão iguais entre si.
(Variáveis do tipo Real - 3 x E9.4)

. LINHA - 18 / CAMPOS - 1 e 2

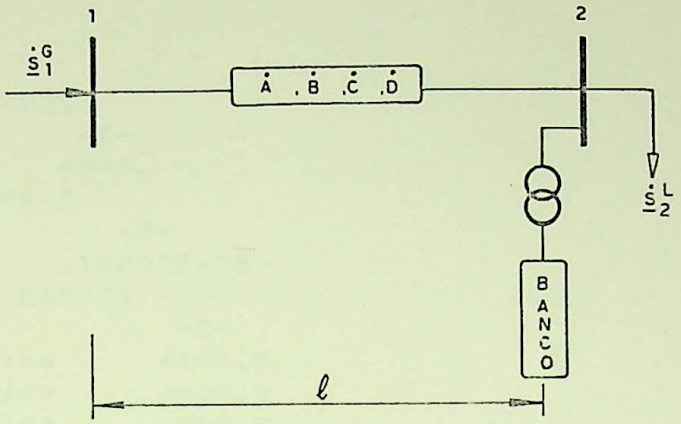
Referem-se aos fatores de aceleração do processo iterativo, partes real e imaginária.
(Variáveis do tipo Real - 2 x E9.4)

NOTA: Na verdade, tais fatores são tomados iguais a 1.Ø, uma vez que, a incorporação do modelo do compensador não afeta a característica de convergência do algorítmo de Newton-Raphson.

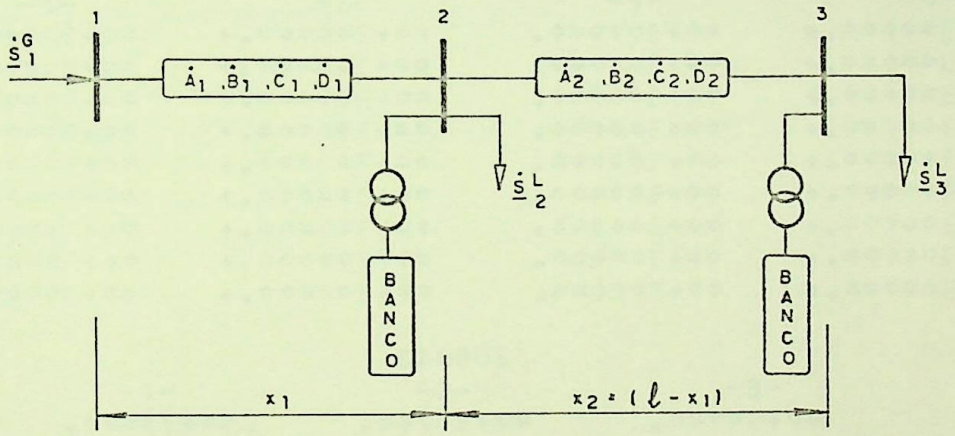
. LINHA - 19 -

Permite plotar os perfis de tensões e correntes ao longo da linha, 1-NÃO, 2-SIM, ? ***
(Variável Inteira - Formato livre)

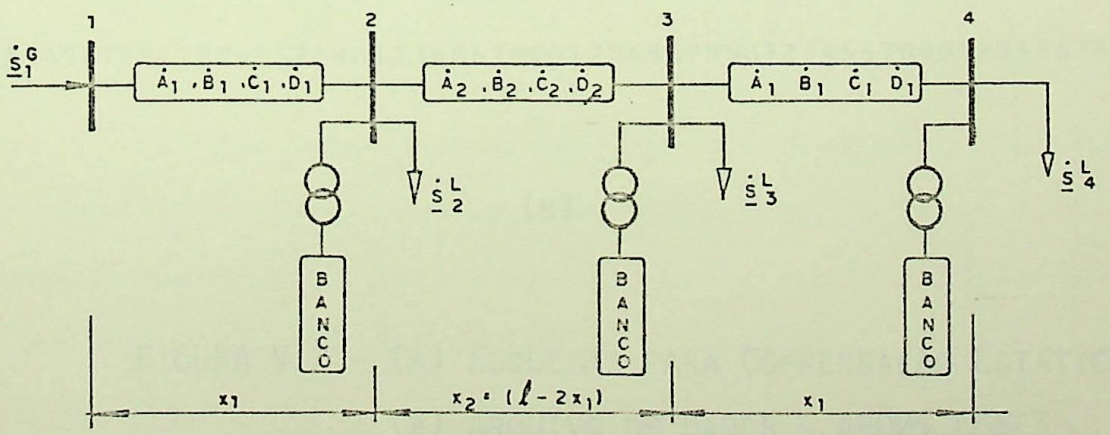
As configurações disponíveis, bem como, a formatação utilizada nas linhas - 1 a 19 - definidas anteriormente, apresentam-se a seguir:



CONF = 1



CONF = 2



CONF = 3

(A)

```
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
                                                                          LINHA
3                                                                           1
1                                                                           2
          CAMPOS
       -1-          -2-
      ****.        ****.                                                    3
          CAMPOS                                                        O
   -1-  -2-          -3-
    *    ***        .10000E-03                                           4
              CAMPOS
         -1-              -2-
     .******E+**       +****.*                                           5
     .******E+**       +****.*                                           6
     .******E+**       +****.*                                           7

                CAMPOS                              CAMPOS
         -1-              -2-              -3-              -4-
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  8
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  9
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  10
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  11
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  12
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  13
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  14
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  15
     .******E+**       +.******E+**     .******E+**       +.******E+**  16

                          CAMPOS
              -1-              -2-              -3-
          .****E+**        .****E+**        .****E+**                    17
             CAMPOS
         -1-              -2-
      .1000E+01        .1000E+01                                          18
*                                                                         19
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
```

(B)

FIGURA V.2 - (A) ESQUEMAS PARA COMPENSAÇÃO ESTÁTICA

(B) ARQUIVO DE DADOS - ARQ05.CONF3

V.5 - EXECUÇÃO DO PROGRAMA - "CELINTRA"

A execução do programa - "CELINTRA" no ambiente - CYBER/930, deve ser precedida das seguintes instruções:

1º) Para obter a formatação desejada

/SETFA $LOCAL.TAPE4 FC=LIST

2º) Para acompanhar o processamento de dados

/REQT $LOCAL.TAPE6

Finalmente, executa-se o programa através da instrução:

/EXET CELINTRA 'TAPE5=ARQØ5.CONFX TAPE19=ARQ19'

onde os arquivos - ARQØ5 e ARQ19 - estão convenientemente definidos.

V.6 - SAÍDA DE DADOS

O relatório de saída é emitido segundo o que se descreve abaixo:

1º) Dados de entrada contendo as condições iniciais do processo iterativo, tais como as tensões iniciais nas barras, normalmente tomadas com um perfil plano, bem como as características dos compensadores estáticos existentes.

2º) Resultados obtidos, sintetizados por três tabelas, a saber:

a - Tensões nodais resultantes nas barras, inclusive aquelas nos barramentos adicionais, fictícios, criados para modelar o compensador. As tensões são listadas em componentes de fase, e numa coluna à direita em componentes sequenciais (zero, positiva e negativa).

b - Correntes nos ramos, e nas fases dos reatores. Tal como para as tensões, as correntes são listadas em componentes de fase e em componentes simétricas.

c - Finalmente, o programa fornece ainda os fluxos das potências ativa e reativa, incluindo a contribuição, por fase, dos compensadores.

O relatório descrito acima pode ser obtido através da seguinte instrução:

```
/PRIF $LOCAL.TAPE4
```

Os arquivos de dados contendo os perfis de tensões e correntes, quando requeridos, podem ser acessados de forma semelhante à que foi descrita no sub-ítem IV.7 do Anexo IV.

A N E X O - VI

MANUAL DO PROGRAMA - PLOTTER

(TRAÇADOR DE CURVAS)

A N E X O - VI

MANUAL DO PROGRAMA - "PLOTTER"

(TRAÇADOR DE CURVAS)

VI.1- INTRODUÇÃO

Este programa tem por objetivo traçar as curvas existentes nos arquivos criados pelos programas "CLINTRA" e "CELINTRA". A unidade de leitura de tais arquivos possui uma formatação compatibílizada com a formatação existente nos arquivos acima referidos. Este programa encontra-se disponível no HP-3ØØØ/ CPD/EFEI.

VI.2- ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA - "PLOTTER"

O programa - "PLOTTER" foi estruturado para traçar os perfis de tensões e correntes em valores reais ou em valores por unidade. Neste último caso, devem ser fornecidos ao programa os valores base de tensão e potência.

Para permitir um perfeito enquadramento das curvas no espaço reservado para o traçado (formato A-4) o programa fornece ao usuário os valores máximos e mínimos dos eixos das abcissas e ordenadas. Por isso, a execução do programa é conversacional.

VI.3- RESTRIÇÕES DO PROGRAMA - "PLOTTER"

. O programa - "PLOTTER" está dimensionado para traçar até 3 (três) curvas de 1010 pontos, cada uma, numa mesma figura. No entanto, o programa fornece a opção de se traçar apenas uma ou duas curvas, independentemente da ordem que a curva a ser traçada ocupa no arquivo.

. O programa permite usar apenas um arquivo por vez, contendo até um máximo de três curvas a serem traçadas.

VI.4- ENTRADA DE DADOS / EXECUÇÃO DO PROGRAMA

Além dos arquivos que contêm os pontos das curvas a serem traçadas e que serão posteriormente definidos ainda neste sub-item o programa solicitará alguns dados durante a execução do mesmo, a saber:

1º) Número de pontos a traçar: NP = ? ***
(Variável Inteira - Formato livre)

2º) Número do "FILE" a ser utilizado: FILE=1Ø ou 2Ø ? ***
(Variável Inteira - Formato livre)

3º) Número de curvas a traçar: NC = ? ***
(Variável Inteira - Formato livre)

4º) Ordem do traçado das curvas: K(J) = ?,?,? ***
(Variável Inteira - Formato livre)

5º) Identificação do estudo: [até 10 (dez) caracteres] ? ***
(Variável String - Formato livre)

6º) O valor mínimo absoluto do eixo das abcissas: XMIN = ? ***
(Variável do tipo Real - Formato livre)

7º) O valor mínimo absoluto do eixo das abcissas: XMÁX = ? ***
(Variável do tipo Real - Formato livre)

8º) O valor mínimo absoluto do eixo das ordenadas: YMIN = ? ***
(Variável do tipo Real - Formato livre)

9º) O valor máximo absoluto do eixo das ordenadas: YMÁX = ? ***

10º) Os nomes e as escalas de cada curva. As variáveis em questão são do tipo String e Real, respectivamente, em formato livre.

Isto feito, o programa solicitará ainda a confirmação de todos os dados já fornecidos. Se não houver confirmação, responde-se "N", e o programa volta a solicitar os nomes e as escalas das curvas a serem traçadas. Se houver confirmação, antes de fazê-la, parar o processamento e entrar em contato com o operador do sistema com a finalidade de solicitar permissão para a utilização do traçador de gráficos, conforme o seguinte procedimento:

- Pressionar a tecla "BREAK". No monitor aparecerá:

.
.

.
. TELLOP "O PLOTER ESTÁ DISPONÍVEL ? "
(pressionar simultaneamente, as teclas, "CTRL" e "G", e só então pressionar a tecla "RETURN").

- Conforme o procedimento anterior, soará um "bip", tanto no monitor do operador do sistema quanto no monitor do usuário.

- Aguardar a resposta do operador do sistema.

- Em caso negativo, aguardar instruções do mesmo operador.

- Em caso afirmativo, escrever:

  : RESUME

  e pressionar a tecla "RETURN".

- Neste instante, aparecerá na tecla do monitor a mensagem:
  "Read pending"
  que é a solicitação da resposta à pergunta pendente, isto é, a confirmação de todos os dados fornecidos ao programa. Finalmente, escreve-se "S", e as curvas começam a ser traçadas.

A execução do programa "PLOTTER" é precedida das seguintes equações de arquivo:

```
: RESET@

: FILE FTNØ7;DEV=24;CCTL

: FILE FTNØ8;DEV=24;CCTL
```

: FILE FTN1Ø=A1Ø ou A3Ø,OLD

e ou

: FILE FTN2Ø=B2Ø ou B4Ø,OLD

A execução, propriamente dita, é iniciada ao escrever a seguinte instrução:

: RUN PLOTTER

Só então pressionar a tecla "RETURN".

DATA 08/06/1990
PROC
PED. PPG
LIV.
Cz$ DOAÇÃO

I V N O
BIM - EFEI
DATA | Rubrica

TESE/89 Tombo 600
621.315.1(043.2)
EFEI / Biblioteca Mauá

Pires, R. C. P667c
Compensação não-convencional de linhas de transmissão de energia elétrica.

.º Registro | Devolver em

EFEI

BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200600
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA