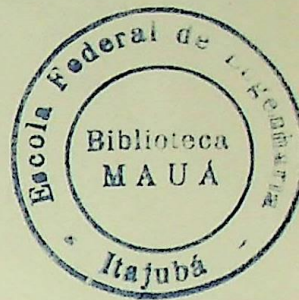


09-02-14  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI



COMPENSAÇÃO SÉRIE EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

WALTER DENIS CRUZ SANCHEZ

ITAJUBÁ, DEZEMBRO DE 1993

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMPENSAÇÃO SÉRIE EM SISTEMAS

ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

WALTER DENIS CRUZ SANCHEZ

Trabalho de dissertação  
apresentado à Comissão de  
Pós-Graduação da Escola Federal de  
Engenharia de Itajubá como parte dos  
requisitos necessários a obtenção do  
título de Mestre em Ciências em  
Engenharia Elétrica.

Orientador : Prof. Hector Arango

Co-Orientador: Prof. A.J. Junqueira Rezek

Itajubá, dezembro de 1993

CLASS 621.315:621.319.44(043,2)  
CITT. C957c  
TORINO 737

621.315:621.319.44(043,2)

Faint, illegible table structure with multiple columns and rows, possibly a ledger or data table.



Ministério da Educação e do Desporto  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## A N E X O I

### PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 463 de 13/12/93, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "*Compensação Série em Sistemas Elétricos de Distribuição*" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Sistemas Elétricos Industriais, satisfeitas as demais exigências regimentais, a *Walter Denis Cruz Sánchez*.

Itajubá, 14 de dezembro de 1993.

Prof. Carlos Rodrigues de Souza  
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Angelo José Junqueira Rezek  
2º Examinador - EFEI

Prof. Héctor Arango  
3º Examinador - EFEI - Orientador



Ministério da Educação e do Desporto  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## A N E X O I I

### FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Compensação Série em Sistemas Elétricos de Distribuição"

Autor: *Walter Denis Cruz Sánchez*

#### JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A <sup>+</sup>	
2º	A <sup>+</sup>	
3º		
4º	XXXXXX	XXXXXX

Resultado Médio: Conceito A<sup>+</sup>, ou seja, \_\_\_\_\_

Aprovado com distinção

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 14 de dezembro de 1993.

Prof. Carlos Rodrigues de Souza  
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Angelo José Junqueira Rezek

2º Examinador - EFEI

Prof. Héctor Arango  
3º Examinador - EFEI - Orientador

## AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Conselho de Desenvolvimento e Intercâmbio pela concessão da bolsa de Estudos, ao Prof. Hélio Araújo pelo apoio, conselhos e orientação orientada a dissertação. Expresso também meu profundo agradecimento ao Prof. A. J. J. Rangel pela sua amizade, auxílio e apoio na parte experimental do estudo.

Finalmente, gostaria de expressar meus especiais agradecimentos à Escola Federal de Engenharia de Itajubá, representada nos professores, alunos e funcionários, os quais colaboraram e brindaram-me sua atenção e hospitalidade, em todo o período estudioso.

A meus pais:  
Cecílio e Estela

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Divisão de Cooperação e Intercâmbio pela concedência da bolsa de Estudos. Ao Prof. Hector Arango pelo apoio, conselhos e oportuna orientação à dissertação. Expresso também meu profundo apreço ao Prof. A.J.J. Rezek pela sua amizade, atenção e apoio na parte experimental do estudo.

Finalmente, extendo meus especiais agradecimentos à Escola Federal de Engenharia de Itajubá, representado nos professores, colegas e funcionários os quais acolheram-me e brindaram-me sua atenção e hospitalidade, que sempre serão lembrados.

## RESUMO

O presente trabalho de dissertação "Compensação Série em Sistemas Elétricos de Distribuição" realiza um estudo teórico-experimental da compensação série quando é aplicado aos sistemas elétricos de distribuição.

Existem, nas redes elétricas do sistema de distribuição, variações de tensão que, algumas vezes, chegam a ser críticas. Nos casos em que se tem cargas importantes na rede, também tem-se alta queda de tensão nos alimentadores do sistema devido principalmente ao comprimento dos cabos e às cargas do alimentador, conduz-se à realização de uma análise técnica da compensação série com banco de capacitores. Desta forma permitem reduzir ou anular o problema das variações e da queda da tensão nas redes elétricas de distribuição.

Os bancos de capacitores série podem ser um meio muito benéfico para a compensação de reativos e controle da tensão nas redes de distribuição. Uma das maiores contribuições deste trabalho está justamente no desenvolvimento de uma teoria simples e de fácil entendimento para a análise da compensação série quando aplicada a diferentes alocações da carga e dos capacitores nos alimentadores das redes de distribuição.

Outra contribuição realizada é o estudo experimental da compensação série para verificar a teoria desenvolvida. Para atingir este objetivo, foi montado um banco de provas que permite simular os alimentadores das redes associando-os ao banco de capacitores e a uma carga.

Finalmente, das duas contribuições mais importantes do trabalho derivam-se as observações e conclusões da aplicação prática da compensação série nos sistemas elétricos de distribuição.

## ABSTRACT

This work of dissertation "Series Compensation in Distribution Electrical Systems" performs a theoretical and experimental study about series compensation when applied to distribution electrical systems.

In the distribution systems electrical networks there are variations of voltage which, sometimes are critical. When there are important loads in the network there is also high voltage drops in the system feeders mainly because of the length of the conductors and of the loads of the feeders. It is necessary to make a technical analysis of series compensation with capacitors bank. Therefore, it is possible to reduce or cancel the problems of variations and drops of the voltage in the distribution system

The series capacitor bank can be a very beneficial way for reactive compensation and voltage control in the distribution network. The major contribution of this work is just the development of a simple theory and easy understanding for a series compensation analysis when applied to different configurations of loads and capacitors in the feeders.

Another contribution made is the experimental study of the series compensation to verify the theory developed. A test bank was assembled for simulation of feeders with different allocations of loads and capacitors.

Out from the two most important contributions of the work, remarks and recommendations have been made for the practical application of series compensation in the distribution system.

## ÍNDICE

	Página
Dedicatória .....	i
Agradecimentos .....	ii
Resumo .....	iii
Abstract .....	iv
Nomenclatura .....	x
Lista de Figuras .....	xv
Lista de Tabelas .....	xxii

## CAPÍTULO

## 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais .....	1
1.2 - O Objetivo do Estudo .....	3
1.3 - A Importância do Estudo .....	3
1.4 - Tópicos Discutidos .....	4

## 2 - DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 - Análise e Cálculo da Compensação em Alimentadores Primários .....	6
2.1.1 - Considerações Gerais .....	6
2.1.2 - Queda de Tensão no Alimentador com Carga Concentrada no Extremo Final e sem Compensação .....	7
2.1.3 - Alimentador com carga Concentrada no Extremo Final e Compensador Alocado no Ponto de Carga .....	9
2.1.3.1 - Queda de Tensão no Alimentador com Carga Variável .....	10
2.1.3.2 - Queda de Tensão no Alimentador Quando Muda o Fator de Potência da carga .....	12

2.1.4 - Alimentador com carga concentrada no Extremo Final e Compensador Alocado no Centro .....	15
2.1.5 - Determinação do Capacitor para Compensação Total .....	17
2.1.6 - Cálculo da Queda de Tensão no Extremo Final do Alimentador Quando se tem Mudança do Fator de Potência .....	19
2.1.7 - Alimentador com Cargas Concentradas Iguais e Distribuídas no seu Comprimento .....	21
2.1.7.1 - Alimentador com Duas Cargas Iguais Concentradas .....	21
- Alocação de Capacitores para Esta Configuração Visando Obter Diferentes Perfis de Tensão ...	22
2.1.7.2 - Alimentador com Oito Cargas Concentradas e Distribuídas no Seu Comprimento .....	24
- Alocação de Capacitores para Compensação de Queda de Tensão .....	25
2.1.7.3 - Alimentador com Carga Uniformemente Distribuída .....	26
- Alocação de Capacitores para Compensação de Queda de Tensão .....	28

	Página
2.1.7.4 - Alimentador com Cargas Concentradas não Iguais .	31
- Alocação de Capacitores para Obter Queda de Tensão Zero nos Pontos de Carga .....	32
2.2 - Cálculo do Capacitor para Compensação Total de Impedâncias Estáticas em Função dos Parâmetros do Alimentador e da Carga ..	33
2.2.1 - Análise do Valor do Capacitor nos Alimentadores .....	39
2.2.2 - Variação da Tensão na Carga com a Mudança da Reatância do Capacitor .	40
2.3 Cálculo do Capacitor para Compensação Total de Cargas Ativas em Função dos Parâmetros do Alimentador e da Potência da Carga .....	41
 3 - ESTUDO EXPERIMENTAL DA COMPENSAÇÃO SÉRIE	
3.1 - Introdução .....	48
3.2 - Descrição Geral do Banco de Testes .....	49
3.3 - Procedimento Seguido para os Ensaios Experimentais .....	49
3.4 - Ensaios Realizados .....	50
3.4.1 - Cargas de Impedância Estática e com Baixo Fator de Potência .....	51
Caso I - Alocação do Capacitor no Extremo Final do Alimentador FP=0.71 ....	51
Caso II - Alocação do Capacitor no Extremo Final do Alimentador FP=0.25 ....	53

	Página
Caso III - Alocação do Capacitor no Centro do Alimen <u>t</u> tador FP=0.30 .....	55
3.4.2 - Cargas de Impedância Estática e com Alto Fator de Potência .....	57
Caso I - Alocação do Capacitor no Extremo Final do Alimentador FP=0.917 ...	57
Caso II - Alocação do Capacitor no Extremo Final do Alimentador FP=0.859 ...	60
3.4.3 - Cargas Ativas .....	64
Caso I - Motor Monofásico .....	64
Caso II - Motor Trifásico .....	67
Caso III - Motor Trifásico .....	68
3.4.4 - Determinação Experimental do Capacitor para Compensação Total ( $\Delta V = 0$ ) .....	72
3.4.5 - Determinação Experimental do Capacitor para Compensação Total Quando Muda o Fator de Potência da Carga .....	74
3.4.6 - Determinação Experimental da Queda de Tensão em Função da Variação do Capacitor .....	76
4 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

INDICE GERAL

Página

APÊNDICE A

Teoria Básica da Compensação Série ..... 87

APÊNDICE B

A Compensação Série no Regime Nominal e na Partida dos Motores Elétricos de Indução ..... 89

APÊNDICE C

Características Técnicas de Cabos de Cobre ..... 94

APÊNDICE D

Banco de Testes ..... 95

APÊNDICE E

Transitórios na Compensação Série ..... 101

## NOMENCLATURA

$C$	→ Capacitância ( $\mu F$ )
$i(t)$	→ Corrente em função do tempo
$\bar{I}$	→ Fasor da corrente do alimentador (A)
$I(S)$	→ Transformada de Laplace da Corrente
$I(0), I'(0)$	→ Valores em $t=0$ da corrente e da derivada de corrente
$I_c$	→ Corrente da carga (A)
$\bar{I}_N$	→ Fasor da corrente nominal do motor (A)
$I_N$	→ Corrente nominal do motor (A)
$I, I_T$	→ Corrente total no alimentador (A)
$I_{NP}, I_{NQ}$	→ Correntes nominais ativa e reativa do motor (A)
$I_P$	→ Componente ativa da corrente (A)
$I_{PD}$	→ Corrente de partida do motor (A)
$I_Q$	→ Componente reativa da corrente (A)
$I_x$	→ Corrente no diferencial de comprimento do alimentador (A)
$K$	→ Corrente total por comprimento total do alimentador (A/m)
$L$	→ Comprimento do alimentador (m)

- $L_1$  → Indutância de dispersão do estator do motor (H)
- $L_2$  → Indutância de dispersão do rotor do motor (H)
- $L_L$  → Indutância do alimentador (H)
- $L_m$  → Indutância de magnetização do motor de indução (H)
- $P_S$  → Potência medida na saída da fonte (W)
- $P_R$  → Potência medida nos bornes da carga (W)
- $P'_C$  → Potência ativa da carga no novo regime (W)
- $P_C$  → Potência ativa da carga (W)
- $P_N$  → Potência nominal do motor (W)
- $Q'_C$  → Potência reativa da carga no novo regime (VAR)
- $Q_C$  → Potência reativa da carga (VAR)
- $Q_{Xcon}$  → Potência reativa do capacitor (VAR)
- $R_C$  → Parte resistiva da carga ( $\Omega$ )
- $R'_L$  → Resistência específica do alimentador ( $\Omega/\text{km}$ )
- $R_L$  → Resistência do alimentador ( $\Omega$ )
- $R_{LA}, R_{LB}, R_{LC}$  → Resistência por fase ( $\Omega$ )
- $R_P$  → Resistência na partida do motor ( $\Omega$ )

$R_1$	→ Resistência do estator ( $\Omega$ )
$R_2$	→ Resistência do rotor ( $\Omega$ )
$S$	→ Potência aparente da carga (VA)
$V_C(S)$	→ Transformada de Laplace da Tensão no Capacitor
$V_{con}$	→ Tensão nos bornes do capacitor (V)
$V$	→ Tensão no alimentador (V)
$V_R$	→ Tensão na carga (V)
$V_m$	→ Valor máximo da tensão (V)
$V_N$	→ Tensão nominal do motor (V)
$V_S$	→ Tensão na fonte (V)
$\bar{V}_R$	→ Fasor de tensão da carga (V)
$\bar{V}_S$	→ Fasor de tensão da fonte (V)
$V_{xcon}$	→ Tensão medida nos bornes do capacitor (V)
$V_{XL}$	→ Tensão medida da reatância do alimentador (V)
$V_C(0), V'(0)$	→ Valores em $t=0$ da tensão e da derivada da tensão do capacitor.
$V_{RL}$	→ Tensão medida da resistência do alimentador (V)
$V_{XC}$	→ Tensão medida da reatância da carga (V)

$V_{RC}$	→ Tensão medida da resistência da carga (V)
$X$	→ Comprimento genérico do alimentador (m)
$X_C$	→ Parte indutiva da carga ( $\Omega$ )
$X'_L$	→ Reatância específica do alimentador ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_{LA}, X_{LB}, X_{LC}$	→ Reatância por fase do alimentador ( $\Omega/\text{km}$ )
$X_{con}$	→ Reatância do capacitor ( $\Omega$ )
$X_P$	→ Reatância na partida do motor ( $\Omega$ )
$X_L$	→ Reatância do alimentador ( $\Omega$ )
$Z_L$	→ Impedância do alimentador ( $\Omega$ )
$\bar{Z}_L$	→ Fator da impedância do alimentador ( $\Omega$ )
$\bar{Z}_m$	→ Fator impedância representativa do motor ( $\Omega$ )
A, B, C	→ Fases do sistema elétrico trifásico (parte experimental)
$dv$	→ Diferencial de queda de tensão (V)
$dx$	→ Diferencial de comprimento do alimentador (m)
$\Delta V'_1$	→ Queda de tensão em um novo regime de operação (V)
$\Delta V'$	→ Queda de tensão específica (V)
$\bar{\Delta V}$	→ Fator da queda de tensão ( $\Omega$ )
$\Delta V$	→ Queda de tensão total (V)

$\Delta V(X)$	→ Queda de tensão em função do comprimento do alimentador (V)
$\Delta V(X=L)$	→ Queda de tensão avaliado em $X=L$ (V)
$\Delta V_{\max}$	→ Queda de tensão máxima no alimentador (V)
$\Delta V(\varphi_t)$	→ Queda de tensão no alimentador em função de $\varphi_t$ (V)
$\Delta V(\theta)$	→ Queda de tensão no alimentador em função de $\theta$ (V)
$\theta$	→ Ângulo do fator de potência da carga calculado (graus)
$\varphi_S$	→ Ângulo do fator de potência visto desde a fonte (graus)
$\varphi_R$	→ Ângulo do fator de potência visto desde os bornes da carga (graus)
$\varphi_C$	→ Ângulo do fator de potência da carga (graus)
$\varphi'_C$	→ Ângulo do fator de potência no novo regime da carga (graus)
$\varphi_N$	→ Ângulo de fator de potência nominal do motor (graus)
$\varphi_t$	→ Ângulo do fator de potência do circuito do alimentador (graus)
$\varphi_P$	→ Ângulo do fator de potência do circuito do alimentador (graus)
$\eta_N$	→ Rendimento nominal do motor
$\phi$	→ Defasagem (graus)
$L^{-1}$	→ Laplaciano inverso
$\omega$	→ Frequência angular (rad/s)

## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.1 - Esquema de um Sistema de Distribuição Radial Mostrando os Alimentadores Troncal e os Laterais.
- Fig. 2.1 - Circuito Monofásico que Representa um Alimentador
- Fig. 2.2 - Alimentador com Carga Concentrada no Extremo e sem Compensação.
- Fig. 2.3 - Esquema do Perfil de Queda de Tensão para um Alimentador com Carga Concentrada no Extremo.
- Fig. 2.4 - Alimentador com Carga e Compensador no Extremo Final.
- Fig. 2.5 - Perfil de Queda de Tensão para Alimentador com Carga Concentrada no Extremo e Compensador Alocado no Ponto de Carga.
- Fig. 2.6 - Alimentador com Carga Variável Concentrada no Extremo.
- Fig. 2.7 - Perfis de Queda de Tensão a Diferentes Regimes de Carga
- Fig. 2.8 - Mudança da Queda de Tensão por Unidade de Potência e Comprimento do Alimentador Quando Muda-se o Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.9 - Variação de  $\Delta V / (L P_c)$  em função da tangente do Ângulo de Fator de Potência da Carga para Diferentes Bitolas.
- Fig. 2.10 - Alimentador com Carga Concentrada no Extremo e Compensador Alocado no Centro.

- Fig. 2.11 - Perfil de Tensão do Alimentador Quando o Capacitor é Alocado no Centro.
- Fig. 2.12 - Valores dos Capacitores para Diferentes Comprimentos do Alimentador Quando Altera-se o Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.12A- Variação da Queda de Tensão por Unidade de Potência Reativa e Resistência do Alimentador Quando Muda-se o Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.13 - Alimentador com Duas Cargas Concentradas e Iguais.
- Fig. 2.14 - Perfil de Queda de Tensão Para o Alimentador com Duas Cargas.
- Fig. 2.15 - Perfis de Tensões para Diferentes Alocações do Capacitor.
- Fig. 2.16 - Alimentador com Oito Cargas Iguais.
- Fig. 2.17 - Perfil de Tensões sem Compensação.
- Fig. 2.18 - Perfil de Tensões com um Capacitor Alocado no Centro do Alimentador.
- Fig. 2.19 - Alimentador com Carga Distribuída Uniformemente.
- Fig. 2.20 - Perfil de Queda de Tensão sem Compensador.
- Fig. 2.21 - Perfil de Queda de Tensão Logo Alocado um Capacitor no Centro.
- Fig. 2.22 - Perfil de Queda de Tensão com alocação de Quatro Capacitores.
- Fig. 2.23 - Alimentador com Cargas Concentradas Diferentes.

- Fig. 2.24 - Perfil de Queda de Tensão.
- Fig. 2.25 - Perfil de Queda de Tensão com Capacitores Alocados de Forma a Ter-se Queda de Tensão Nula no Ponto de Carga.
- Fig. 2.26 - Circuito para o Cálculo do Capacitor.
- Fig. 2.27 - Variação do Maior Valor do Capacitor com o Ângulo de Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.28 - Variação do Menor Valor do Capacitor com o Ângulo de Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.29 - Variação da Potência Reativa e Tensão em Bornes do Capacitor do Menor Valor em Função do ângulo de Fator de Potência.
- Fig. 2.30 - Variação da Potência Reativa e Tensão em Bornes do Capacitor de Maior Valor em Função do ângulo de Fator de Potência.
- Fig. 2.31 - Comportamento da Tensão em Bornes da Carga em Função da Reatância do Condensador.
- Fig. 2.32 - Circuito do Alimentador com Capacitor e Carga.
- Fig. 2.33 - Valores de Capacitor Maior para Compensação Total Quando Altera-se o Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.34 - Valores de Capacitor Menor para Compensação Total em Função do Ângulo de Fator de Potência da Carga.
- Fig. 2.35 - A Tensão em Bornes da Carga em Função da Reatância do Capacitor.

- Fig. 3.1 - Esquema da Montagem do Circuito para Testes de Cargas Monofásicos.
- Fig. 3.2 - Esquema da Montagem do Circuito para o Caso de Testes de Cargas Trifásicas.
- Fig. 3.3 - Circuito do Alimentado para o Caso de Circuito Monofásico.
- Fig. 3.4 - Diagrama Fasorial (Caso I).
- Fig. 3.5 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.6 - Diagrama Fasorial.
- Fig. 3.7 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.8 - Diagrama Fasorial.
- Fig. 3.9 - Perfil de Tensões.
- Fig. 3.10 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.11 - Diagrama Fasorial.
- Fig. 3.12 - Perfil de Tensões.
- Fig. 3.13 - Curvas Experimentais da Tensão na Carga e a Queda de Tensão em Função de  $X_{con}$
- Fig. 3.14 - Circuito Representativo do Alimentador.
- Fig. 3.15 - Diagrama Fasorial.
- Fig. 3.16 - Perfil de Tensões.
- Fig. 3.17 - Curvas Experimentais de Queda de Tensão.

- Fig. 3.18 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.19 - Diagrama Fasorial.
- Fig. 3.20 - Tensão e Corrente na Carga.
- Fig. 3.21 - Queda de Tensão em Função da Reatância do Capacitor.
- Fig. 3.22 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.23 - Diagrama Fasorial (Caso II).
- Fig. 3.24 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.25 - Diagrama Fasorial (Caso III).
- Fig. 3.26 - Tensão na Carga em função do Capacitor  $X_{con}$  (Caso III).
- Fig. 3.27 - Corrente na Carga em Função do Capacitor para Motor Funcionando a Vazio (Caso III).
- Fig. 3.28 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.29 - Curvas para a Determinação Experimental dos Capacitores para Compensação Total e Variação da Corrente.
- Fig. 3.30 - Circuito do Alimentador.
- Fig. 3.31 - Potência e Reatância do Capacitor Quando Muda o Ângulo de Fator de Potência.
- Fig. 3.32 - Variação da Queda de Tensão para Diferentes Comprimentos do Alimentador em Função da Reatância do Capacitor.

- Fig. A.1 - Esquema do Circuito Monofásico de um Alimentador Radial com Capacitor Série e Carga Concentrada no Extremo Final.
- Fig. A.2 - Diagrama Fasorial de Tensões para o Alimentador Radial sem Capacitor Série.
- Fig. A.3 - Diagrama Fasorial de Tensões para um Alimentador Radial com Capacitor Série.
- Fig. B.1 - Circuito Equivalente ao Alimentador com Capacitor e Motor.
- Fig. B.2 - Circuito Equivalente ao Motor na Partida.
- Fig. B.3 - Circuito do Alimentador com Capacitor.
- Fig. B.4 - Circuito do Alimentador sem Capacitor.
- Fig. D.1 - Gráfico da Variação de Indutância com a Posição do Núcleo nos Reatores Variáveis.
- Fig. D.2 - Vista Geral A do Banco de Testes.
- Fig. D.3 - Vista Geral B do Banco de Testes.
- Fig. D.4 - Vista dos Reatores de Núcleo Variável.
- Fig. D.5 - Vista do Conjunto de Componentes Utilizados no Banco de Testes.
- Fig. E.1 - Circuito Equivalente da Fonte, Alimentador e Motor.
- Fig. E.2 - Circuito Equivalente.
- Fig. E.3 - Circuito Equivalente.

- Fig. E.4 - Transitório de Partida do Motor de Indução para  $C = 100 \mu\text{F}$  ( Simulada com o programa anexo).
- Fig. E.5 - Transitório da Partida do Motor de Indução para  $C = 30 \mu\text{F}$  ( Simulada com o programa anexo).
- Fig. E.6 - Transitório do Curto-Circuito no Banco de Capacitores (Simulação Feita no ATP - Tensão).
- Fig. E.7 - Transitório do Curto-Circuito na Carga (Simulação Feita no ATP - Tensão).
- Fig. E.8 - "Plotagem" da Partida do Motor de Indução (Corrente) para  $C = 40 \mu\text{F}$ .
- Fig. E.9 - "Plotagem" da Partida do Motor de Indução (Tensão) para  $C = 40 \mu\text{F}$ .

Tab. 3.12 - Valores Experimentais para  $L = 40 \mu\text{H}$

Tab. 3.13 - Valores Experimentais para  $L = 15 \mu\text{H}$

Tab. 3.14 - Valores Experimentais para  $L = 25 \mu\text{H}$

Tab. 3.15 - Comparação de Simulação

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1  
Tabela 3.2  
Tabela 3.3  
Tabela 3.4  
Tabela 3.5  
Tabela 3.6  
Tabela 3.7  
Tabela 3.8  
Tabela 3.9  
Tabela 3.10

Dados Experimentais

Tabela 3.11 - Valores Experimentais para  $L = 5$  [km]

Tabela 3.12 - Valores Experimentais para  $L = 10$  [km]

Tabela 3.12 - Valores Experimentais para  $L = 15$  [km]

Tabela 3.14 - Valores Experimentais para  $L = 25$  [km]

Tabela 3.15 - Comparação de Resultados

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

### 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conhecida é a função que cumpre o sistema elétrico de distribuição no conjunto do sistema elétrico de potência, ele absorve a energia das fontes de geração e a distribui ao usuário. Frequentemente, encontramos dois tipos de sistemas de distribuição: o radial e em anéis (malhas).

Este trabalho se insere mais no sistema radial, já que ele é mais usado em áreas urbanas e rurais, pelas empresas concessionárias de eletricidade.

No sistema radial, encontramos um alimentador troncal que sai radialmente da subestação e logo temos os alimentadores laterais (ou ramos) que saem do troncal (vide Fig. 1.1)

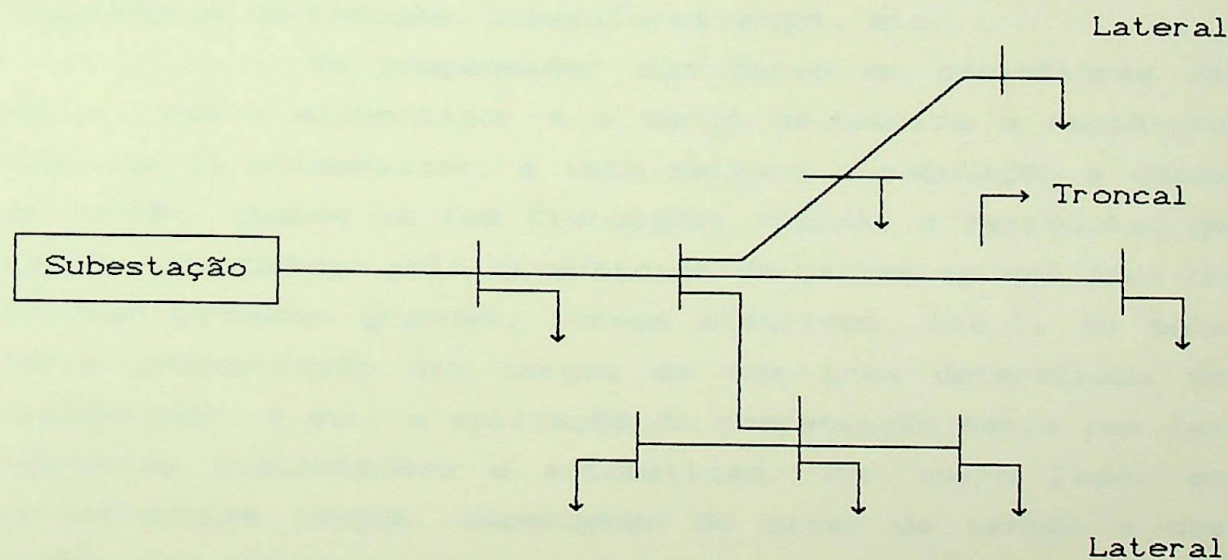


Fig. 1.1 - Esquema de um Sistema de Distribuição Radial Mostrando os Alimentadores Troncal e os Laterais.

O fornecimento da energia elétrica aos

usuários está sujeito a um conjunto de fatores técnicos interdependentes do sistema de distribuição. Assim, podemos destacar os mais importantes:

- \_ Densidade de carga
- \_ Área de serviço
- \_ Níveis de tensão
- \_ Materiais
- \_ Comprimento dos alimentadores
- \_ Quedas de tensão

Justamente na operação dos sistemas de distribuição, tem-se que ressaltar o problema da queda de tensão para não superar os limites permissíveis estabelecidos pelas normas elétricas.

Assim, este estudo incide na compensação da queda de tensão nos alimentadores troncais e laterais com bancos de capacitores série.

Existem muitos dispositivos elétricos que permitem compensar a queda de tensão, assim temos os reguladores de indução, capacitores shunt, etc.

Um compensador com banco de capacitores em série com o alimentador e a carga neutraliza a reatância indutiva do alimentador, e isto melhora a regulação e queda de tensão. Quando se tem flutuações rápidas e periódicas da tensão, produzidas pela diversidade de cargas em uma área de serviço (motores grandes, fornos elétricos, etc.), ou pela forte concentração das cargas em uma área determinada do alimentador, é útil a aplicação da compensação série por ter respostas instantâneas e automáticas. Por outro lado, em alimentadores longos, dependendo do nível de tensão e dos tipos de cargas alimentadas, os limites de potência e considerações de estabilidade são requerimentos que incrementam os custos unitários de potência.

Outro aspecto a considerar é a alocação do capacitor no alimentador e a tensão na carga que será a mesma independente do ponto de alocação. A grandeza do incremento de tensão no lado de carga do capacitor é aproximadamente

$$I \cdot X_{\text{con}} \cdot \text{Sen } \varphi_c$$

onde:  $I \text{ Sen } \varphi_c \longrightarrow$  corrente reativa do circuito [A]  
 $X_{\text{con}} \longrightarrow$  reatância capacitiva [ $\Omega$ ]

Quando as cargas são distribuídas no comprimento do alimentador, então a alocação do capacitor ou capacitores será de forma tal que a tensão no alimentador seja a mais uniforme possível.

A compensação série com capacitores tem que levar em conta algumas dificuldades na operação de outros componentes do sistema elétrico, mas esses problemas são superados totalmente ou minimizados de forma tal a permitir uma operação normal do sistema.

## 1.2 - OBJETIVO DO ESTUDO

O objetivo do estudo é de desenvolver uma metodologia teórica da compensação série utilizando bancos de capacitores para corrigir as flutuações e quedas de tensão nos alimentadores dos sistemas de distribuição, quando se tem diferentes configurações dos circuitos, tanto na alocação dos capacitores, como na distribuição das cargas.

Outro objetivo é realizar um estudo experimental da compensação série para verificar e complementar a teoria desenvolvida.

Para este último objetivo, necessitou-se fazer a montagem de um circuito que permita simular a operação dos alimentadores com diferentes alocações dos bancos de capacitores e, também, diferentes tipos de cargas. Desta forma, o estudo pretende observar a compensação série destacando os aspectos técnicos mais relevantes nos sistemas de distribuição.

## 1.3 - A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

As empresas fornecedoras de energia elétrica

devem cumprir com o atendimento de servir aos usuários de eletricidade de áreas urbanas ou rurais. Esse atendimento será a tempo, com qualidade e confiabilidade mas, estas exigências de fornecimento são restringidas por causas técnicas e econômicas.

Diversas são as soluções técnicas aos problemas que se apresentam nos sistemas elétricos de distribuição. Nesse sentido, colocamos o presente estudo como uma alternativa técnica à solução da compensação da queda de tensão nos alimentadores dos circuitos dos sistemas elétricos de distribuição.

Conhecida é a falta de atendimento de eletricidade nas zonas rurais pelo fato de estarem afastadas dos centros de fornecimento de eletricidade, como acontece em zonas de altas densidades de carga, onde se tem diferentes tipos de carga, o que conduz a uma baixa qualidade de serviço. É nesse sentido a motivação do presente estudo visando aperfeiçoar os conhecimentos técnicos da compensação série para maior benefício econômico e social, tanto às empresas fornecedoras quanto aos usuários.

## 1.4 - TÓPICOS DISCUTIDOS

Neste item, provemos uma breve revisão da organização da dissertação. Mas temos que assinalar as restrições feitas no estudo, assim temos:

- \_ Não se considera mudança de níveis de tensões no comprimento do alimentador.
- \_ Não se considera mudança na bitola do alimentador.
- \_ Trabalha-se, prioritariamente, com o circuito equivalente monofásico no caso de circuitos trifásicos.

No Capítulo II, são apresentadas as análises e cálculos teóricos dos perfis de tensão devido à alocação de

bancos de capacitores nos alimentadores quando se tem diferentes tipos de cargas, tais como: cargas concentradas e distribuidas, sejam uniformes e não uniformes. Na última parte deste capítulo desenvolve-se a teoria necessária para calcular o capacitor em função dos parâmetros elétricos do alimentador e da carga.

No Capítulo III, realiza-se o estudo experimental da compensação série em sistemas de distribuição. Para atingir este objetivo, fez-se a montagem de um modelo elétrico para simular os alimentadores com diferentes alocações do compensador e diferentes tipos de cargas, como impedâncias estáticas com diferentes fatores de potência e cargas dinâmicas, como motores elétricos.

O Capítulo IV, contém as observações, conclusões e recomendações dos estudos realizados.

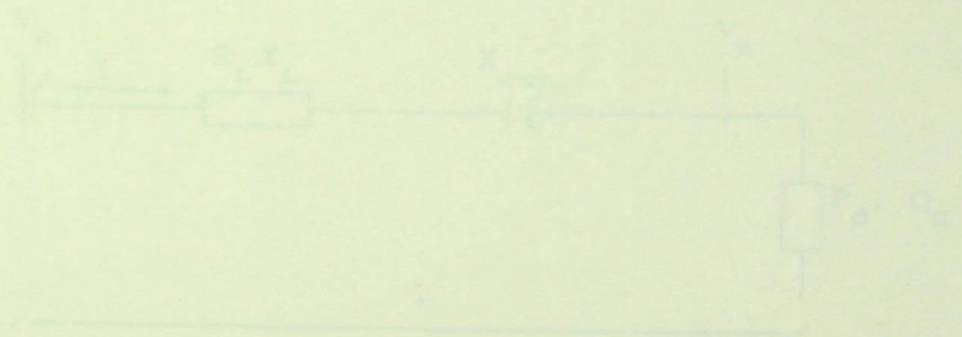


Fig. 2.1 - Circuito Montado que Representa um Alimentador

segundo a distribuição das cargas e a alocação dos capacitores, a configuração do circuito alimentador anterior adota.

no desenvolvimento de compensação série realizada...  
Montagem não é o mesmo devido a que não se...  
para utilizar precisamente os capacitores...  
utilizados.

## CAPÍTULO II

## DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

## 2.1 - ANÁLISE E CÁLCULO DA COMPENSAÇÃO EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

## 2.1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma configuração inicial do modelo do circuito adotado para a análise da compensação no alimentador será o circuito equivalente monofásico, vide Fig. 2.1. Ela é independente do sistema trifásico da distribuição. Para revisão de alguns conceitos básicos da compensação série vide Apêndice A.

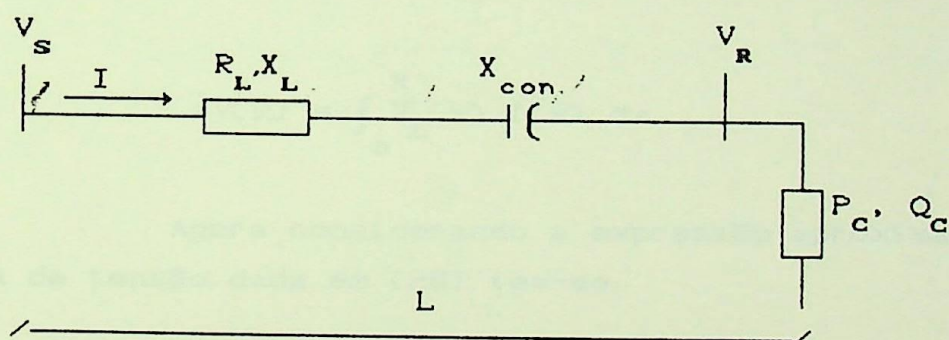


Fig. 2.1 - Circuito Monofásico que Representa um Alimentador

Segundo a distribuição das cargas e a alocação dos capacitores, a configuração do circuito alimentador anterior mudará.

NOTA : No desenvolvimento da dissertação muitas referências bibliográficas não são citadas devido a que elas só foram utilizadas genericamente no levantamento bibliográfico.

## 2.1.2 - QUEDA DE TENSÃO NO ALIMENTADOR COM CARGA CONCENTRADA NO EXTREMO SEM COMPENSAÇÃO

No circuito mostrado na Fig. 2.2

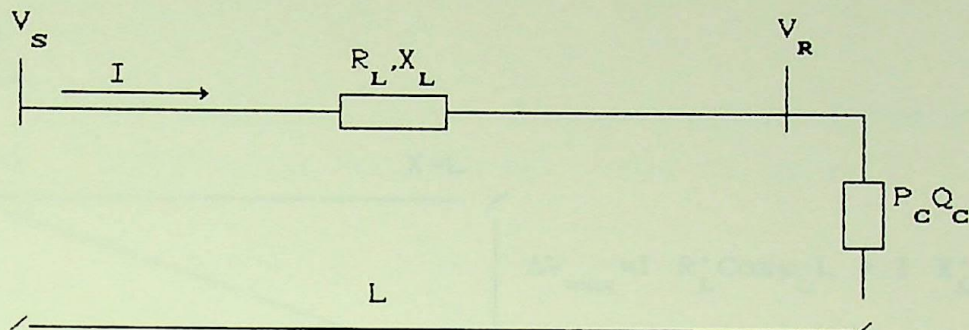


Fig. 2.2 - Alimentador com Carga Concentrada no Extremo e sem Compensação

Da expressão para a queda de tensão, tem-se:

$$\Delta V(x) = \int_0^x Z_L(x) I(x) dx \quad (2.1)$$

Agora considerando a expressão aproximada para a queda de tensão dada em [28] tem-se:

$$\Delta V' = I R_L' \cos \varphi_c + I X_L' \sin \varphi_c \quad (2.2)$$

Nesta expressão,  $R_L'$  e  $X_L'$  são valores específicos ( $\Omega/\text{km}$ ). Logo, aplicando (2.1) a (2.2) e sabendo que a carga é concentrada no extremo, temos:

$$\Delta V(X=L) = \int_0^L I R_L' \cos \varphi_c dx + \int_0^L I X_L' \sin \varphi_c dx \quad (2.3)$$

logo:

$$\Delta V(X=L) = I R'_L \cos \varphi_c L + I X'_L \sin \varphi_c L \quad (2.4)$$

Desta forma pode-se representar o esquema do perfil de queda de tensão no alimentador. Vide a Fig. 2.3.

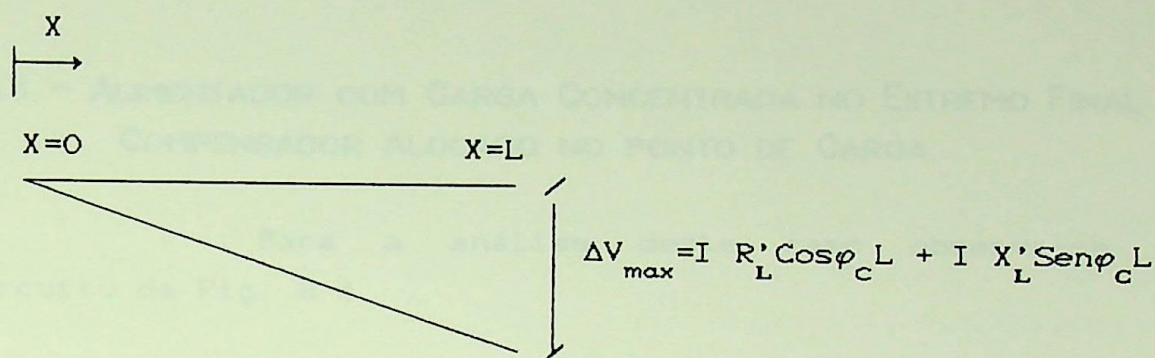


Fig. 2.3 - Esquema do Perfil de Queda de Tensão para um Alimentador com Carga Concentrada no Extremo.

Salienta-se que a relação (2.2) pode também ser representada da seguinte forma.

Fazendo:

$$I \cos \theta = I_P \quad (2.5)$$

$$I \sin \theta = I_Q \quad (2.6)$$

aqui resulta

$$P_C = I_P V \quad (2.7)$$

$$Q_C = I_Q V \quad (2.8)$$

Substituindo em (2.2) obtém -se:

$$\Delta V = \frac{(R'_L P_C + X'_L Q_C) L}{V} \quad (2.9)$$

Esta relação mostra a dependência da queda de tensão com as características de potência da carga.

Para  $V = 1$  p.u., tem-se:

$$\Delta V = L R'_L P'_C + L X'_L Q'_C \quad (2.10)$$

### 2.13 - ALIMENTADOR COM CARGA CONCENTRADA NO EXTREMO FINAL E COMPENSADOR ALOCADO NO PONTO DE CARGA

Para a análise deste caso observa-se o circuito da Fig. 2.4.

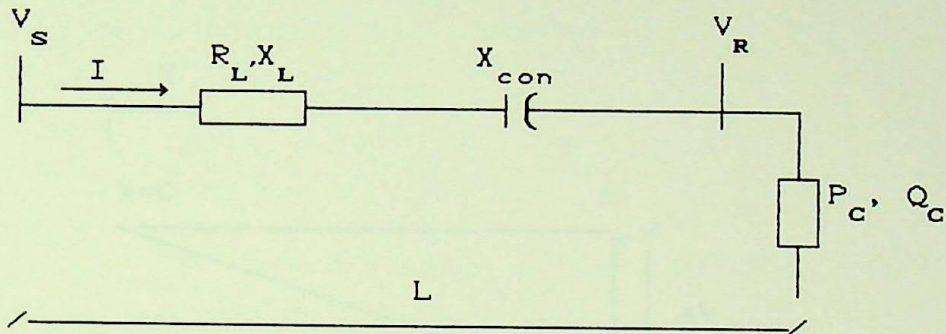


Fig. 2.4 - Alimentador com Carga e Compensador no Extremo Final.

O perfil de tensão para esta configuração, sem tomar em conta o compensador, é similar ao esquema mostrado na Fig. 2.3.

O efeito do compensador  $X_{con}$  será calculado segundo a seguinte expressão de queda de tensão:

$$\Delta V = I R'_L \cos \varphi_C L + I X'_L \sin \varphi_C L - I X_{con} \sin \varphi_C \quad (2.11)$$

Da Fig. 2.3 observa-se que a queda de tensão é máxima quando o comprimento do alimentador é  $X=L$  (no

extremo). Logo, temos que:

$$\Delta V = I R'_L \cos \varphi_c L + I X'_L \text{Sen } \varphi_c L \quad (2.12)$$

Para compensação total ( $\Delta V=0$ ) no extremos temos de (2.11) e (2.12)

$$\Delta V_{\max} = I X_{\text{con}} \text{Sen } \varphi_c \quad (2.13)$$

O perfil de tensão incluindo o efeito do compensador para que a queda de tensão seja zero no extremo é mostrado na Fig. 2.5. Nela observa-se o deslocamento produzido pelo capacitor no extremo do alimentador.

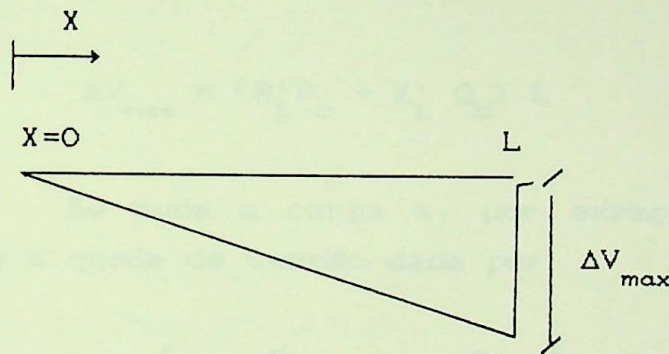


Fig. 2.5 - Perfil de Queda de Tensão para Alimentador com Carga Concentrada no Extremo e Compensador Alocado no Ponto de Carga.

### 2.13.1 - QUEDA DE TENSÃO NO ALIMENTADOR COM CARGA VARIÁVEL

Partindo da expressão da queda de tensão dada em (2.10), pode-se obter os perfis de queda de tensão quando se tem mudanças da carga. Seja o circuito mostrado na Fig. 2.6.

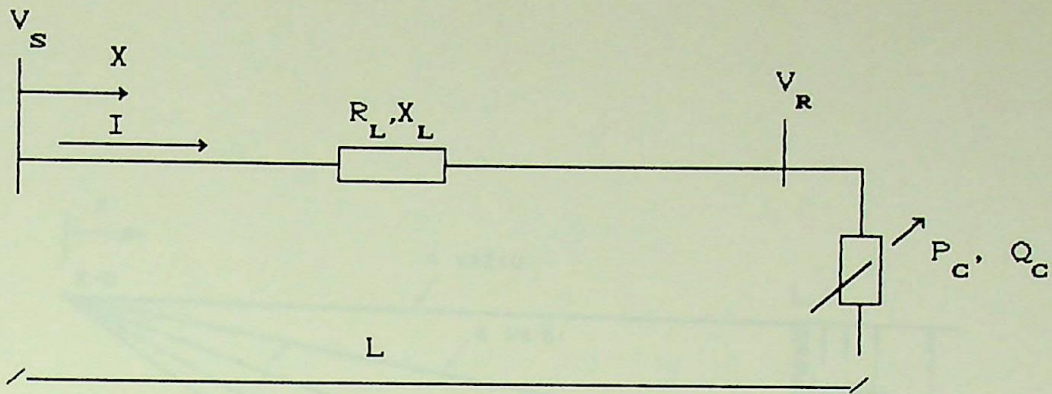


Fig. 2.6 - Alimentador com Carga Variável Concentrada no Extremo.

Chamando  $\Delta V_{\max}$  à expressão dada por (2.10) para o regime de plena carga, tem-se:

$$\Delta V_{\max} = (R'_L P_C + X'_L Q_C) L \quad (2.14)$$

Se muda a carga a, por exemplo, meia carga, então tem-se a queda de tensão dada por:

$$\Delta V_{1/2} = \left[ R'_L \frac{P_C}{2} + X'_L \frac{Q_C}{2} \right] L \quad (2.15)$$

Tendo em conta (2.14), pode-se escrever a queda de tensão máxima nesse regime de carga.

$$\Delta V_{1/2} = \frac{\Delta V_{\max}}{2} \quad (2.16)$$

Assim, pode-se obter expressões para diferentes regimes. Na Fig. 2.7 pode-se observar os perfis de tensão para diferentes regimes de carga.

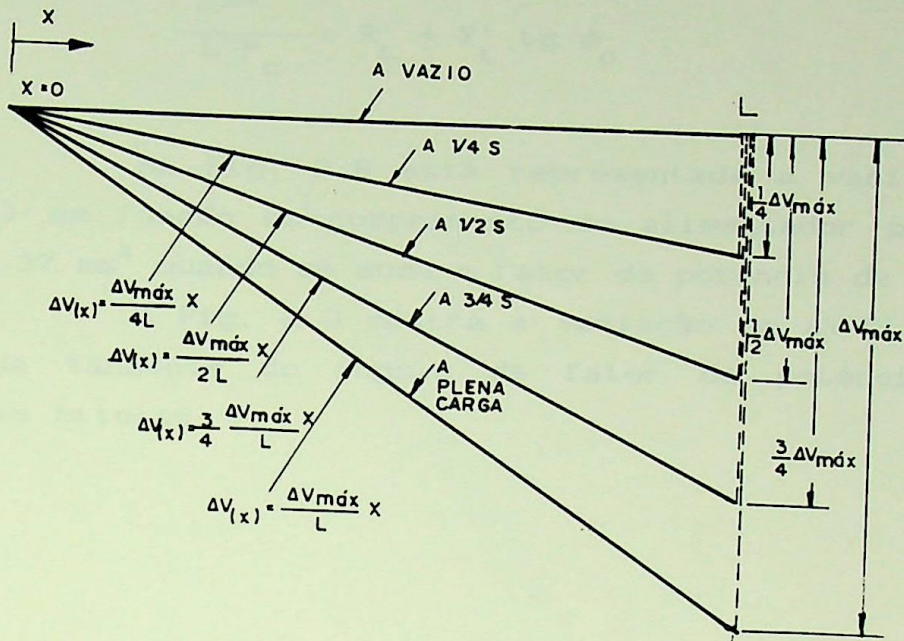


Fig. 2.7 - Perfis de Queda de Tensão a Diferentes Regimes de Carga

### 2.1.3.2 - QUEDA DE TENSÃO NO ALIMENTADOR QUANDO MUDA O FATOR DE POTÊNCIA DA CARGA.

Da expressão (2.10):

$$\Delta V = L R'_L P_C + L X'_L Q_C,$$

pode-se obter:

$$\Delta V = L P_C \left[ R'_L + X'_L \frac{Q_C}{P_C} \right] \quad (2.17)$$

Ainda mais, como  $Tg \phi_c = \frac{Q_c}{P_c}$

$$\frac{\Delta V}{L P_c} = R'_L + X'_L tg \phi_c \quad (2.18)$$

Na Fig. 2.8 está representada a variação de  $\Delta V/(L P_c)$  em função do comprimento do alimentador para uma bitola  $8.37 \text{ mm}^2$  quando se muda o fator de potência da carga.

A Fig. 2.9 mostra a variação de  $\Delta V/(L P_c)$  em função da tangente do ângulo de fator de potência para diferentes bitolas.

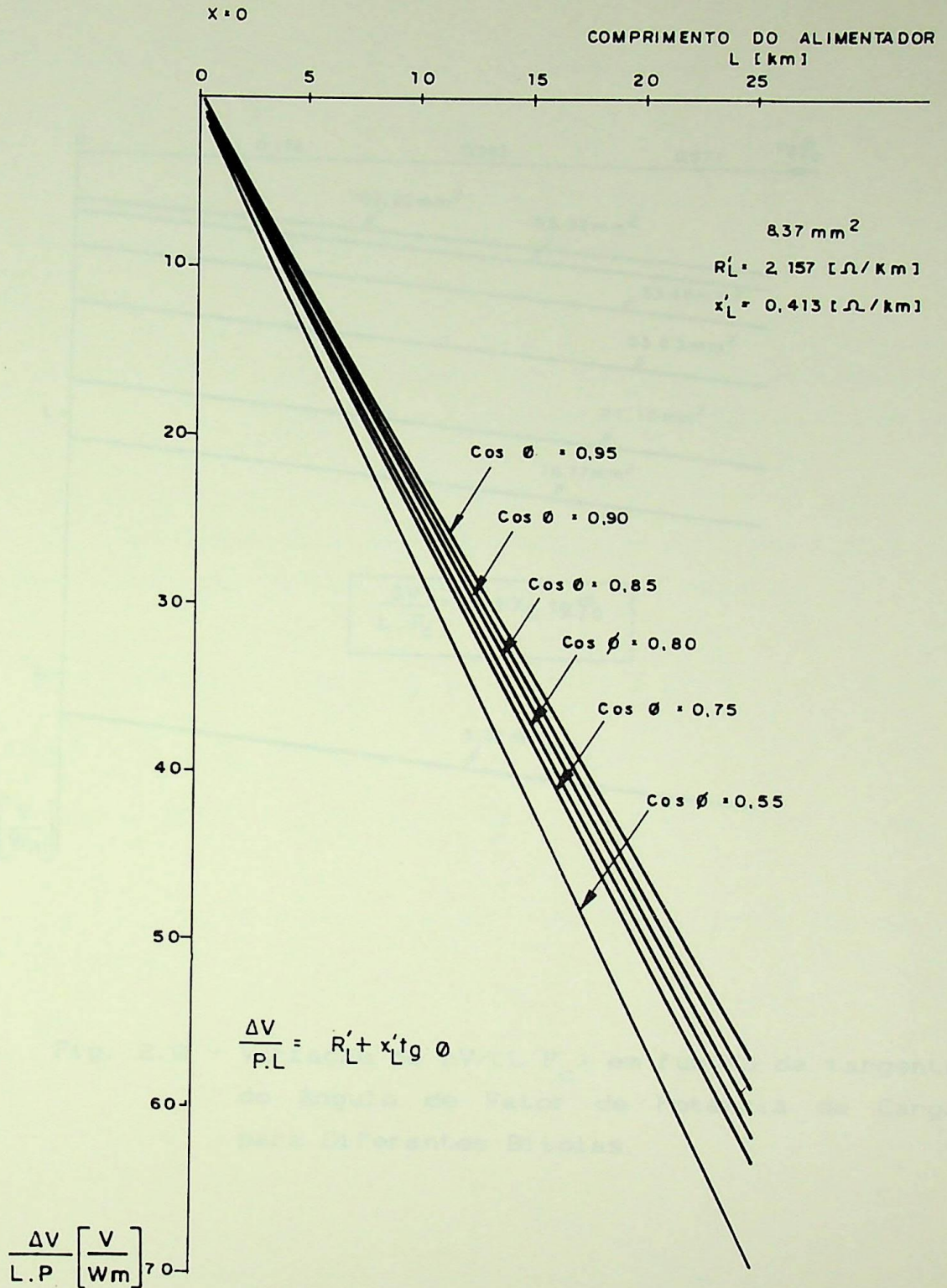


Fig. 2.8 - Mudança da Queda de Tensão por Unidade de Potência e Comprimento do Alimentador Quando Muda-se o Fator de Potência da Carga.

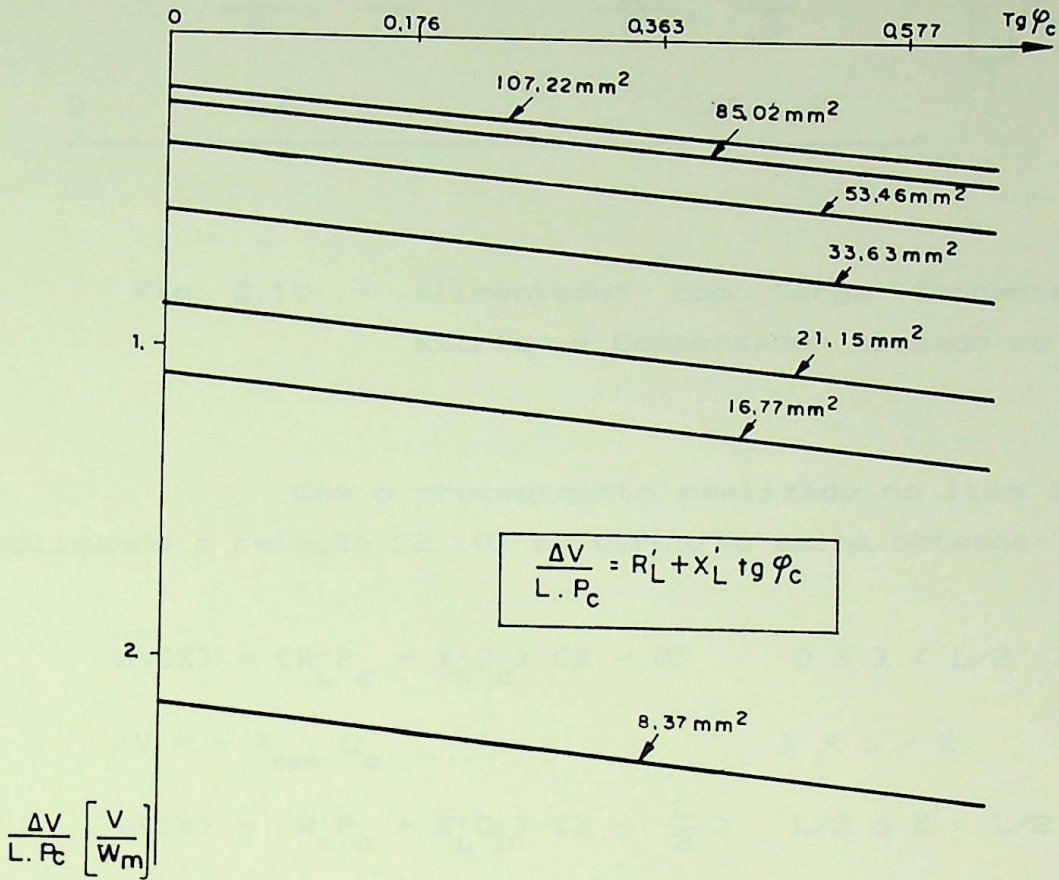


Fig. 2.9 - Variação de  $\Delta V / (L P_c)$  em função da tangente do Ângulo de Fator de Potência da Carga para Diferentes Bitolas.

#### 2.14 - ALIMENTADOR COM CARGA CONCENTRADA NO EXTREMO E COM COMPENSADOR ALOCADO NO CENTRO

Na Fig. 2.10 está representado o alimentador com compensador colocado no centro.

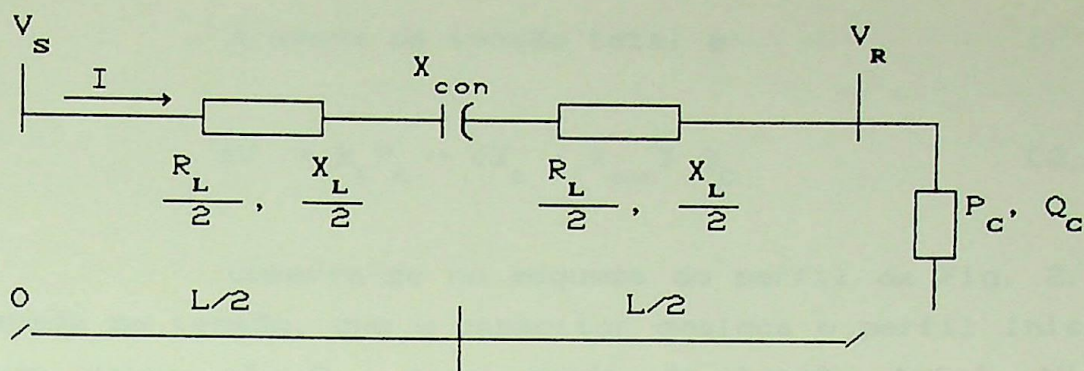


Fig. 2.10 - Alimentador com Carga Concentrada no Extremo e Compensador Alocado no Centro.

Com o procedimento realizado no item 2.1.2, e aplicando a relação (2.10) ao circuito acima obtemos:

$$\Delta V(X) = (R'_L P_c + X'_L Q_c) (X - 0) \quad 0 \leq X < L/2 \quad (2.19)$$

$$\Delta V = - X_{con} Q_c \quad X = L / 2 \quad (2.20)$$

$$\Delta V(X) = (R'_L P_c + X'_L Q_c) (X - \frac{L}{2}) \quad L/2 \leq X < L/2 \quad (2.21)$$

Desta forma, o perfil de queda de tensão para este caso será:

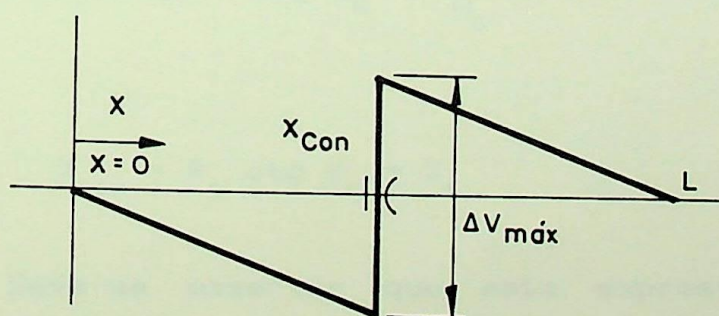


Fig. 2.11 - Perfil de Tensão do Alimentador Quando o Capacitor é Alocado no Centro.

A queda de tensão total é:

$$\Delta V = R_L P_C + (X_L - X_{con}) Q_C \quad (2.22)$$

Observa-se no esquema do perfil da Fig. 2.11. de queda de tensão, que o capacitor desloca o perfil inicial em um valor  $-X_{con} Q_C$ , e a queda de tensão total  $\Delta V_t$  é diminuída em um valor  $X_{con} Q_C$ .

## 2.15 - DETERMINAÇÃO DO CAPACITOR PARA COMPENSAÇÃO TOTAL QUANDO O COMPENSADOR E A CARGA ESTÃO ALOCADOS NO EXTREMO FINAL DO ALIMENTADOR

Se na expressão (2.22) fizer-se  $\Delta V=0$ , logo obtém-se:

$$\Delta V = R_L P_C + X_L Q_C - X_{con} Q_C = 0 \quad (2.23)$$

daqui,

$$X_{con} = R_L \left( \frac{P_C}{Q_C} \right) + X_L \quad (2.24)$$

Esta expressão pode ser apresentada de outra forma, tendo em conta que:  $\text{ctg } \phi_C = \frac{P_C}{Q_C}$   
logo:

$$X_{con} = R_L \text{ctg } \phi_C + X_L \quad (2.25)$$

Deve-se observar que esta expressão é uma aproximação para o valor reatância capacitiva  $X_{con}$ . Além disso, este valor se mantém enquanto o fator de potência  $\cos \phi$  também seja constante para que a queda de tensão no ponto de carga seja zero.

Na Fig. 2.12 pode-se obter um capacitor em

( $\mu\text{F}$ ) ou a reatância capacitiva correspondente ( $\Omega$ ) para diferentes valores do fator de potência da carga ( $\cos\varphi_c$ ) quando é alimentado por um cabo  $8.37 \text{ mm}^2$  com comprimentos de alimentador que variam na faixa desde 1 km até 25 km.

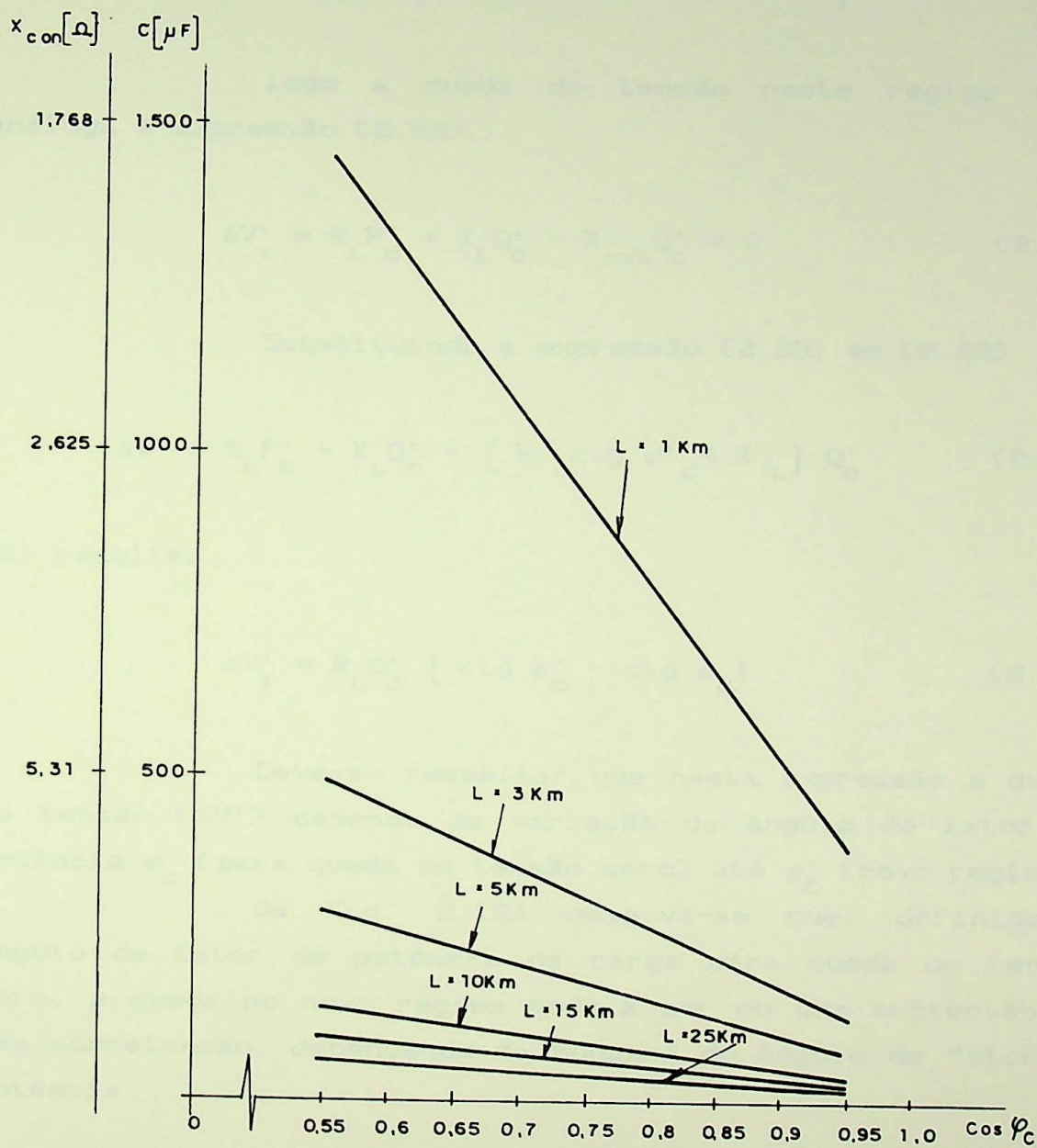


Fig. 2.12 - Valores dos Capacitores para Diferentes Comprimentos do Alimentador Quando Altera-se o Fator de Potência da Carga.

## 2.16 - CÁLCULO DA QUEDA DE TENSÃO NO EXTREMO DO ALIMENTADOR QUANDO SE TEM MUDANÇA DO FATOR DE POTÊNCIA DA CARGA.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sendo: } P'_c \rightarrow \text{Potência ativa} \\ Q'_c \rightarrow \text{Potência reativa} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Novo regime} \\ \text{da carga} \end{array}$$

logo a queda de tensão neste regime será análoga à expressão (2.23).

$$\Delta V'_1 = R_L P'_c + X_L Q'_c - X_{\text{con}} Q'_c = 0 \quad (2.26)$$

Substituindo a expressão (2.25) em (2.26)

$$\Delta V'_1 = R_L P'_c + X_L Q'_c - (R_L \text{ctg } \varphi'_c + X_L) Q'_c \quad (2.27)$$

daí resulta:

$$\Delta V'_1 = R_L Q'_c (\text{ctg } \varphi'_c - \text{ctg } \varphi_c) \quad (2.28)$$

Deve-se ressaltar que nesta expressão a queda de tensão ( $\Delta V'_1$ ) depende da variação do ângulo de fator de potência  $\varphi_c$  (para queda de tensão zero) até  $\varphi'_c$  (novo regime).

Da Fig. 2.12A observa-se que, definido o ângulo de fator de potência da carga para queda de tensão zero, a queda no novo regime poderá ser ou uma subtensão ou uma sobretensão, dependendo da mudança do ângulo de fator de potência.

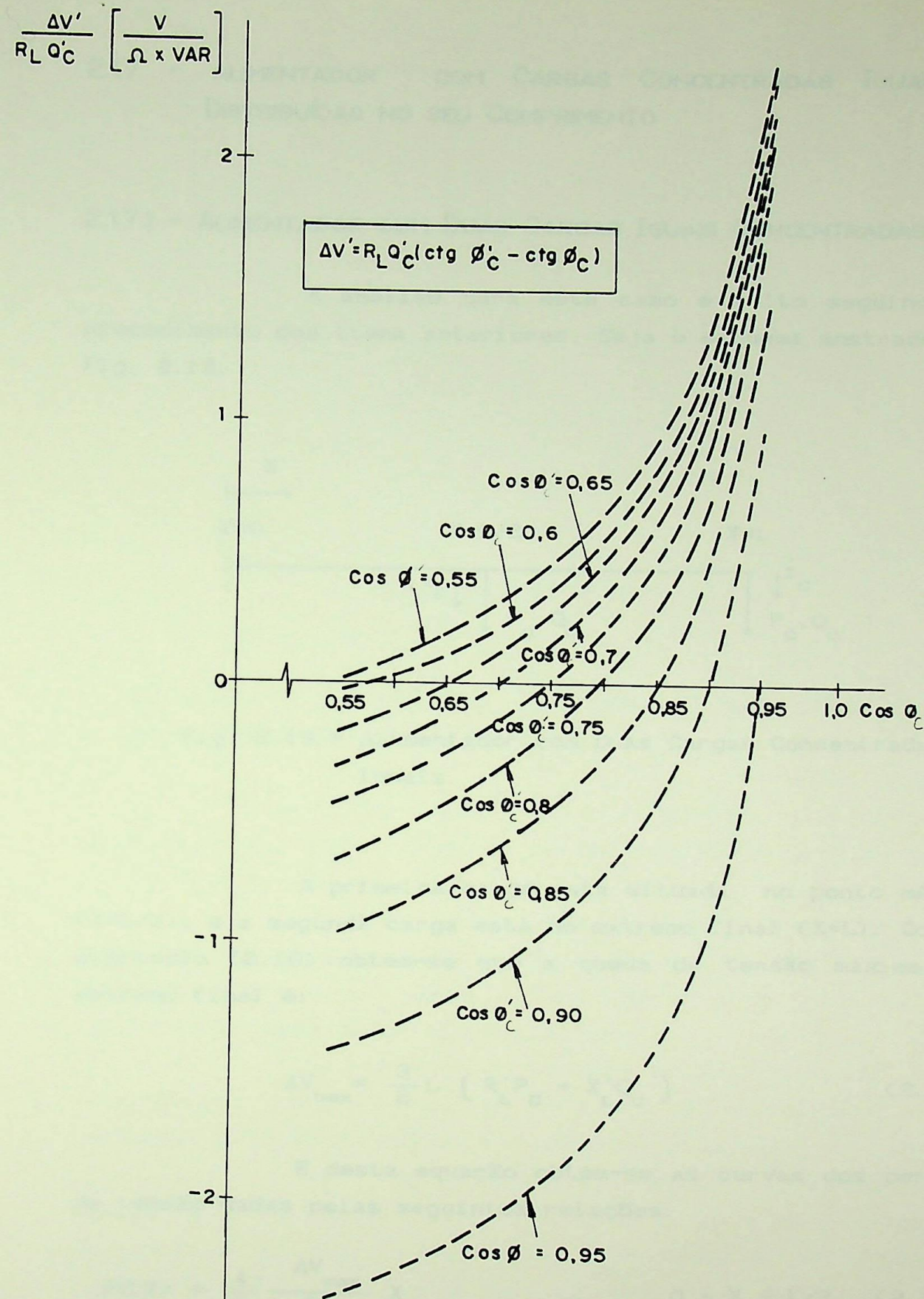


Fig. 2.12A - Variação da Queda de Tensão por Unidade de Potência Reativa e Resistência do Alimentador Quando se Muda o Fator de Potência da Carga.

## 2.17 - ALIMENTADOR COM CARGAS CONCENTRADAS IGUAIS E DISTRIBUÍDAS NO SEU COMPRIMENTO

### 2.17.1 - ALIMENTADOR COM DUAS CARGAS IGUAIS CONCENTRADAS

A análise para este caso é feita seguindo o procedimento dos itens anteriores. Seja o esquema mostrado na Fig. 2.13.

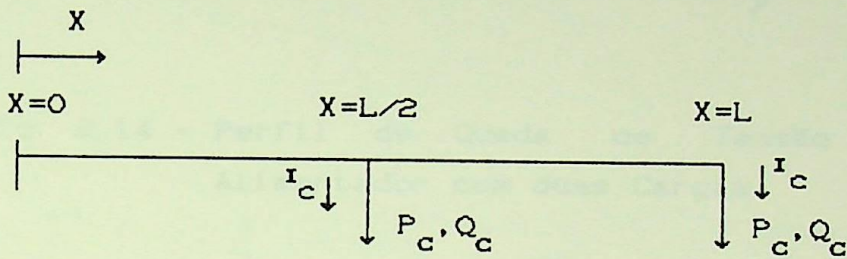


Fig. 2.13 - Alimentador com Duas Cargas Concentradas e Iguais.

A primeira carga está situada no ponto médio ( $X=L/2$ ), e a segunda carga está no extremo final ( $X=L$ ). Com a expressão (2.10) obtém-se que a queda de tensão máxima no extremo final é:

$$\Delta V_{\max} = \frac{3}{2} L ( R'_L P_c + X'_L Q_c ) \quad (2.29)$$

E desta equação obtém-se as curvas dos perfis de tensão dadas pelas seguintes relações:

$$\Delta V(X) = \frac{4}{3} \frac{\Delta V_{\max}}{L} X \quad 0 \leq X \leq L/2 \quad (2.30)$$

$$\Delta V(X) = \frac{2}{3} \Delta V_{\max} + \frac{2}{3} ( X - L/2 ) \Delta V_{\max} \quad L/2 \leq X \leq L \quad (2.31)$$

O perfil de tensão resultante é mostrado na Fig. 2.14.

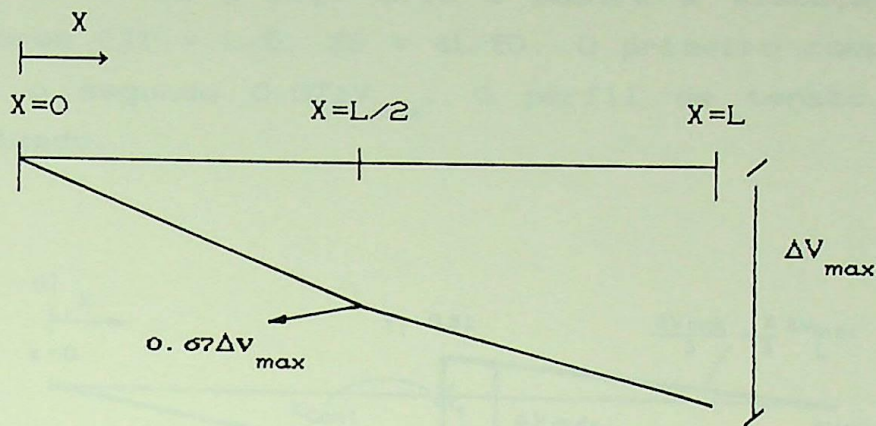


Fig. 2.14 - Perfil de Queda de Tensão para o Alimentador com duas Cargas.

Alocação de Capacitores para esta Configuração Visando Obter Diferentes Perfis de Tensão

A Fig. 2.15 mostra diferentes alocações dos compensadores. Para obter os perfis de tensão procede-se de forma similar tratados nos itens anteriores.

Na Fig. 2.15 a, o compensador está alocado no ponto médio do alimentador e pode-se observar que a queda de tensão no ponto de carga do extremo é zero. O capacitor compensa a queda de tensão máxima ( $\Delta V_{max}$ ).

Na Fig. 2.15 b, estão alocados dois capacitores ( $X_1 = L/4$  e  $X_2 = 3L/4$ ), e o primeiro deles compensa  $0.67 \Delta V_{max}$  enquanto o segundo,  $0.33 \Delta V_{max}$ .

Na Fig. 2.15 c, estão alocados três capacitores ( $X_1 = L/4$ ,  $X_2 = L/2$ ,  $X_3 = 3L/4$ ) e cada capacitor compensa  $0.33 \Delta V_{max}$ . Observa-se que o perfil de queda de tensão é mais uniforme e não se tem queda de tensão nos pontos de carga.

A Fig. 2.15 d mostra a alocação de quatro capacitores ( $X_1 = L/5$ ,  $X_2 = 2L/5$ ,  $X_3 = 3L/5$ ,  $X_4 = 4L/5$ ). Cada capacitor compensa  $0.33 \Delta V_{max}$ , e no primeiro

ponto de carga não há queda de tensão, enquanto no segundo há sobretensão de  $0.33 \Delta V_{\max}$ .

Já a Fig. 2.15 e mostra a alocação de dois capacitores ( $X_1 = L/5$ ,  $X_2 = 4L/5$ ). O primeiro compensa  $0.33 \Delta V_{\max}$  e o segundo  $0.67 \Delta V_{\max}$ . O perfil de tensão não está uniformizado.

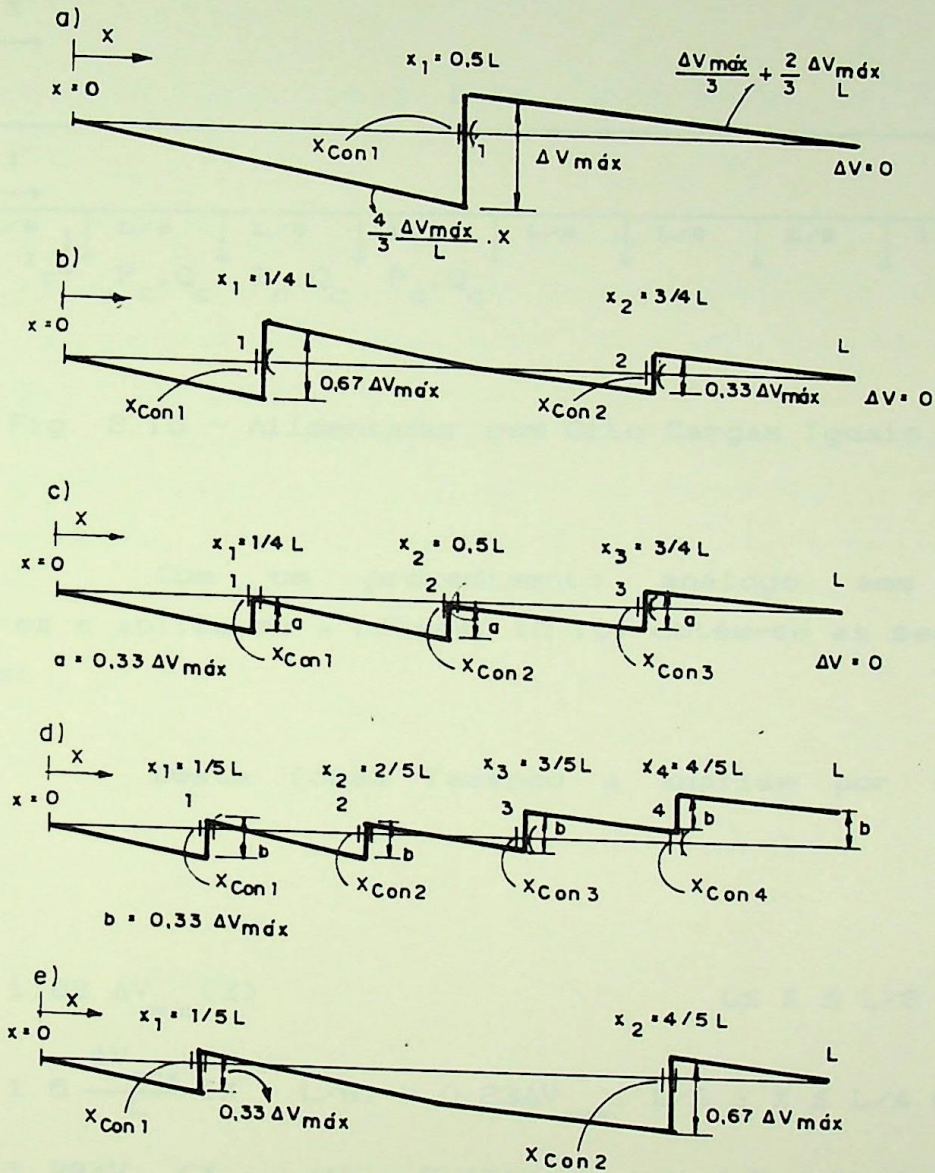


Fig. 2.15 - Perfis de Tensões para Diferentes Alocações do Capacitor

## 2.1.7.2 - ALIMENTADOR COM OITO CARGAS CONCENTRADAS E DISTRIBUIDAS NO SEU COMPRIMENTO

Neste caso faz-se a análise de um alimentador com oito cargas iguais ( $P_c, Q_c$ ) e igualmente espaçadas (separação  $L/8$ ) tal como é mostrado na Fig. 2.16.

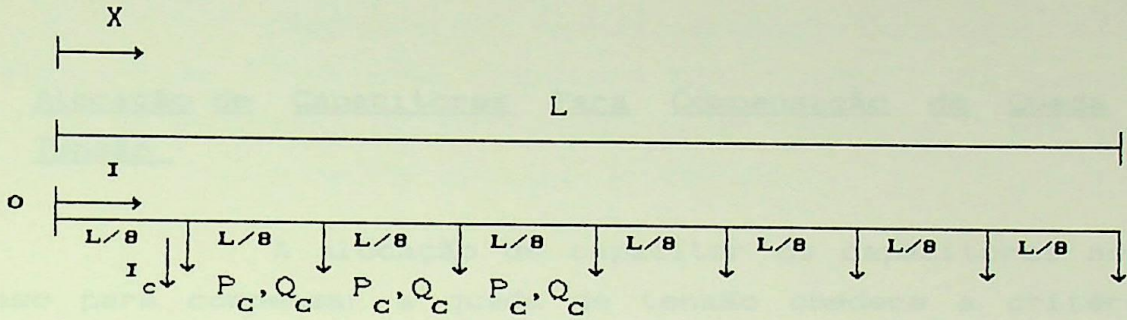


Fig. 2.16 - Alimentador com Oito Cargas Iguais

Com um procedimento análogo aos itens anteriores e aplicando a relação (2.10) obtém-se as seguintes relações:

Desta forma fazendo a análise por trechos tem-se:

$$\Delta V(X) = 1.82 \Delta V_{\max}(X) \quad 0 \leq X \leq L/8 \quad (2.32)$$

$$\Delta V(X) = 1.6 \frac{\Delta V_{\max}}{L} (X - L/8) + 0.23 \Delta V_{\max}, \quad L/8 \leq X \leq L/4 \quad (2.33)$$

$$\Delta V(X) = 1.28 \Delta V_{\max} (X - L/4) + 0.43 \Delta V_{\max} \quad L/4 \leq X \leq 3L/8 \quad (2.34)$$

$$\Delta V(X) = 0.96 \Delta V_{\max} (X - 3L/8) + 0.59 \Delta V_{\max} \quad 3L/8 \leq X \leq L/2 \quad (2.35)$$

$$\Delta V(X) = 0.88 \Delta V_{\max} (X - L/2) + 0.71 \Delta V_{\max} \quad L/2 \leq X \leq 5L/8 \quad (2.36)$$

$$\Delta V(X) = 0.82 \Delta V_{\max} + 0.72 \Delta V_{\max} (X - 5L/8) \quad 5L/8 \leq X \leq 3L/4 \quad (2.37)$$

$$\Delta V(X) = 0.91\Delta V_{\max} + 0.44\Delta V_{\max} (X - 3L/4) \quad 3L/4 \leq X \leq 7L/4 \quad (2.38)$$

$$\Delta V(X) = 0.965\Delta V_{\max} + 0.28\Delta V_{\max} (X - 7L/8) \quad 7L/8 \leq X \leq L \quad (2.39)$$

Com as equações anteriores da queda de tensão por trechos pode-se construir o perfil de queda de tensão. Este é mostrado na Fig. 2.17

### Alocação de Capacitores Para Compensação de Queda de Tensão.

A alocação de capacitor ou capacitores neste caso para compensar a queda de tensão obedece a critérios técnico-econômicos e de beneficiar com a compensação ao maior número de cargas penduradas no alimentador.

Aqui analisaremos o caso de alocar um capacitor no centro do alimentador de forma tal a se obter queda de tensão zero no extremo final do alimentador. Assim obtém-se o perfil de queda de tensões mostrado na Fig. 2.18.

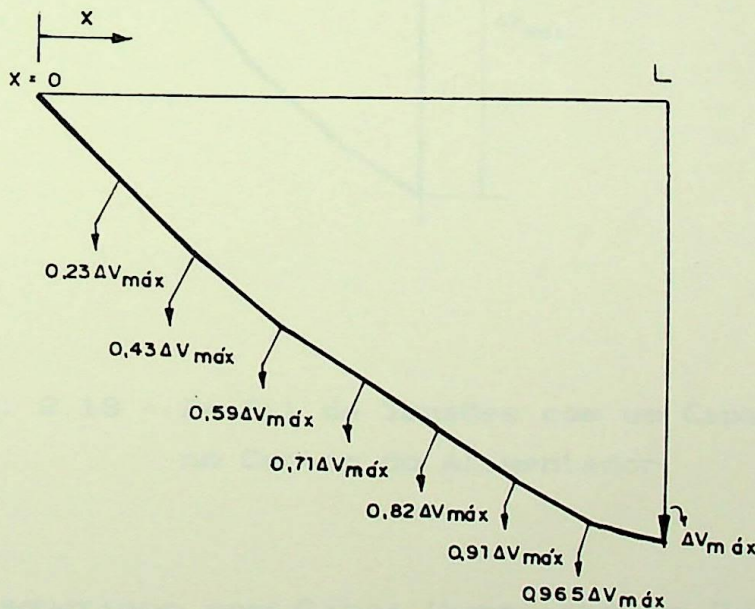


Fig. 2.17 - Perfil de Tensões sem Compensação

Do perfil de queda de tensão da Fig. 2.18, observa-se que:

- \_ só a metade das cargas do alimentador são beneficiadas com o capacitor alocado.
- \_ a metade das cargas são submetidas a sobretensão.
- \_ O capacitor está concentrado.

Ressalta-se que a alocação dos capacitores deve ser de forma tal a uniformizar o perfil de queda de tensão e o dimensionamento dos capacitores terá que estar sujeito a critérios de otimização econômica.

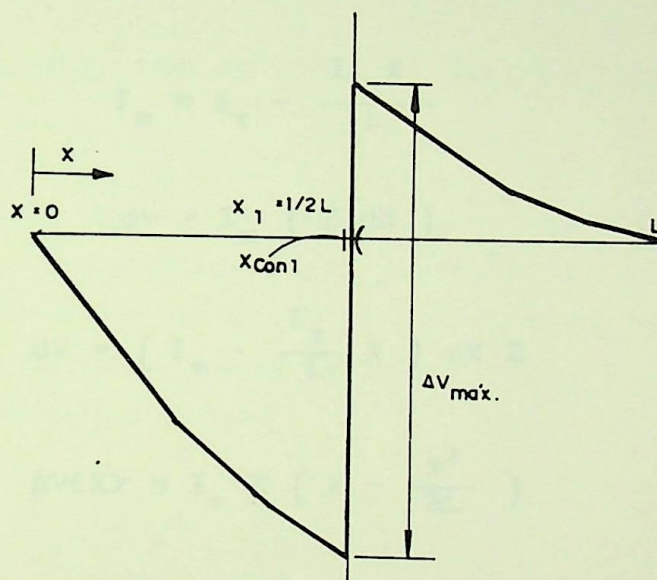


Fig. 2.18 - Perfil de Tensões com um Capacitor Alocado no Centro do Alimentador.

### 2.1.7.3 - ALIMENTADOR COM CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA

Na Fig. 2.19, mostra-se o esquema do circuito para a análise deste caso.

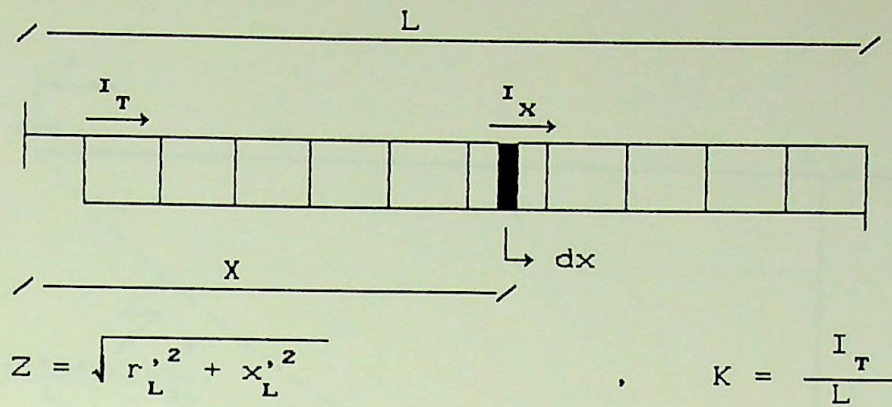


Fig. 2.19 - Alimentador com Carga Distribuída Uniformemente.

logo:

$$I_X = I_T - \frac{I_T X}{L} \quad (2.40)$$

$$dv = I_X (Z dx) \quad (2.41)$$

$$dV = \left( I_T - \frac{I_T}{L} X \right) dx Z \quad (2.42)$$

$$\Delta V(X) = I_T Z \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) \quad (2.43)$$

$$\text{Fazendo } \Delta V(X=L) = \Delta V_{\max} = I_T Z \left( L - \frac{L^2}{2L} \right) \quad (2.44)$$

$$I_T Z = 2 \frac{\Delta V_{\max}}{L} \quad (2.45)$$

Logo a queda de tensão em qualquer ponto pode também ser dada pela expressão seguinte:

$$\Delta V(X) = 2 \frac{\Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) \quad (2.46)$$

Na Fig. 2.20 está representado o perfil de queda de tensão.

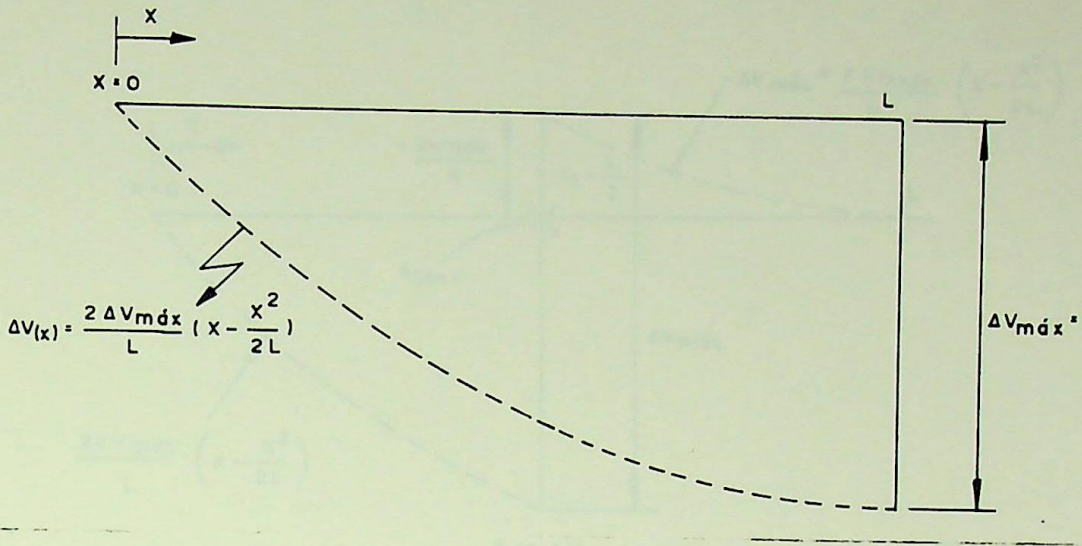


Fig. 2.20 - Perfil de Queda de Tensão sem Compensador

### Alocação de Capacitores para a Compensação de Queda de Tensão

Na Fig. 2.21 mostra-se o perfil de queda de tensão quando é alocado um capacitor no centro do alimentador visando a obter queda de tensão zero no extremo final do alimentador e, observa-se o seguinte:

As curvas de queda de tensão

$$\Delta V(X) = \frac{2 \Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) \quad 0 \leq X \leq L/2 \quad (2.47)$$

$$\Delta V(X) = \frac{2 \Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) - \Delta V_{\max} \quad L/2 \leq X \leq L \quad (2.48)$$

Igualmente aos casos anteriores, apenas a metade das cargas do alimentador são beneficiadas pelo capacitor ( $L/2 \leq X \leq L$ ) de compensação, mas também essa porção de carga está submetida a uma sobretensão.

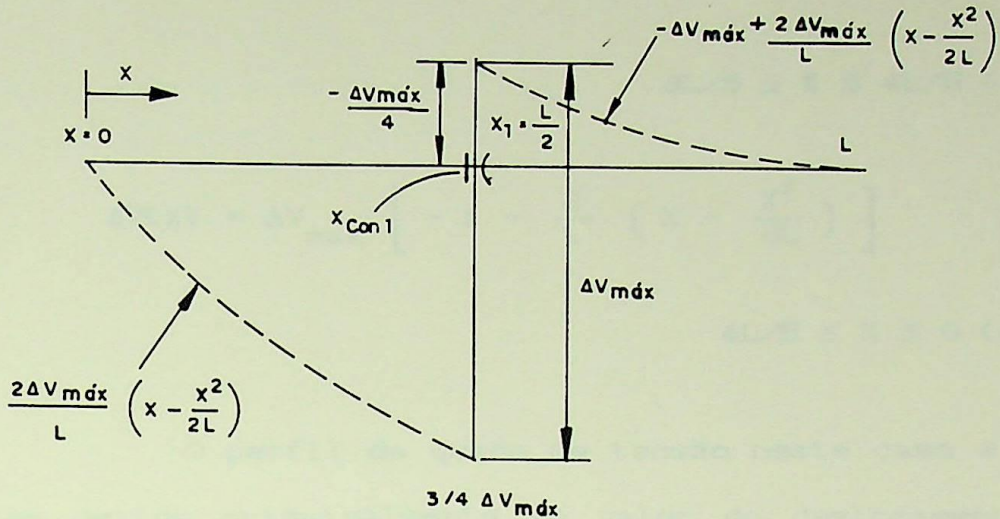


Fig. 2.21 - Perfil de Queda de Tensão Logo Alocado um Capacitor no Centro.

Na Fig. 2.22, mostra-se outro esquema de perfil de queda de tensão devido à alocação dos capacitores de compensação. Aqui se tem quatro capacitores para diferentes valores de deslocamento de tensão. Desta forma podemos destacar as curvas de tensão:

$$\Delta V(X) = \frac{2 \Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) \quad 0 \leq X \leq L/5 \quad (2.49)$$

$$\Delta V(X) = \frac{2 \Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) - 0.6 \Delta V_{\max} \quad L/5 \leq X \leq L/5 \quad (2.50)$$

$$\Delta V(X) = \frac{2 \Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) - 0.8 \Delta V_{\max} \quad 2L/5 \leq X \leq 3L/5 \quad (2.51)$$

$$\Delta V(X) = \frac{2 \Delta V_{\max}}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) - 0.9 \Delta V_{\max}$$

$$3L/5 \leq X \leq 4L/5 \quad (2.52)$$

$$\Delta V(X) = \Delta V_{\max} \left[ -1 + \frac{2}{L} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right) \right]$$

$$4L/5 \leq X \leq 0 \quad (2.53)$$

O perfil de queda de tensão neste caso é mais uniforme devido principalmente ao valor do deslocamento da tensão provocado pelos capacitores:

$X_{\text{con1}}$	→	$0.6 \Delta V_{\max}$
$X_{\text{con2}}$	→	$0.2 \Delta V_{\max}$
$X_{\text{con3}}$	→	$0.1 \Delta V_{\max}$
$X_{\text{con4}}$	→	$0.1 \Delta V_{\max}$

Pode-se observar, também, que 80% da carga é beneficiada com a compensação.

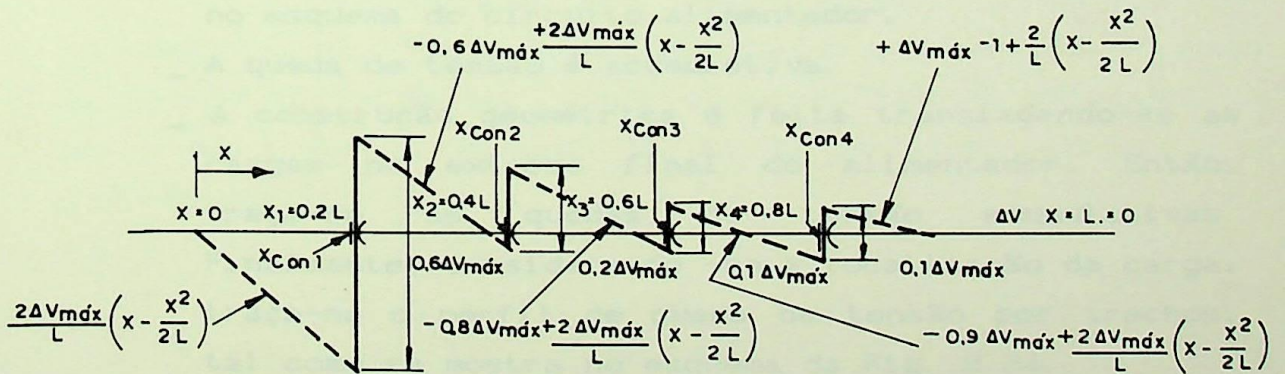


Fig. 2.22 - Perfil de Queda de Tensão com alocação de Quatro Capacitores.

### 2.1.7.3 - ALIMENTADOR COM CARGAS CONCENTRADAS DIFERENTES

No esquema da Fig. 2.23, apresenta-se o caso mais típico dos alimentadores dos sistemas de distribuição com cargas puntuais não uniformes.

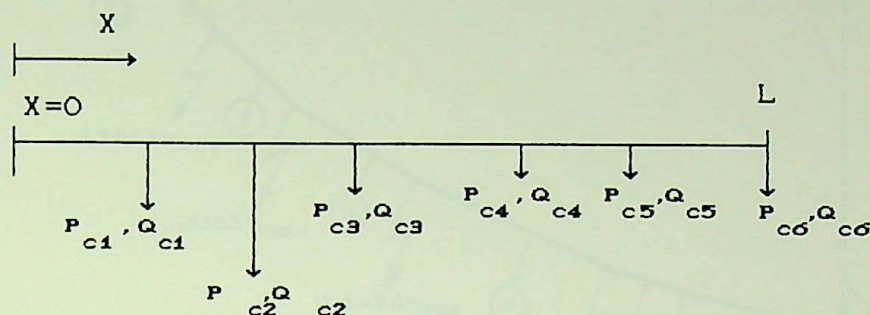


Fig. 2.23 - Alimentador com Cargas Concentradas Diferentes

Agora, para determinar o perfil de tensão, toma-se as suposições restritivas feitas no Capítulo I, item 1.4. Logo procede-se à construção geométrica do perfil tendo em conta o seguinte:

- \_ A carga é proporcional a seta que representa a carga no esquema do circuito alimentador.
- \_ A queda de tensão é acumulativa.
- \_ A construção geométrica é feita trasladando-se as cargas no extremo final do alimentador. Então, traça-se as quedas de tensão acumulativas. Finalmente, considerando-se a localização da carga, traça-se o perfil de queda de tensão por trechos, tal como se mostra no esquema da Fig. 2.24.

Observando os perfis de queda de tensão (vide Fig. 2.24), pode-se afirmar que quando em um alimentador estão penduradas cargas não iguais, ela pode ser aproximada por um perfil de queda de tensão de cargas iguais igualmente espaçadas.

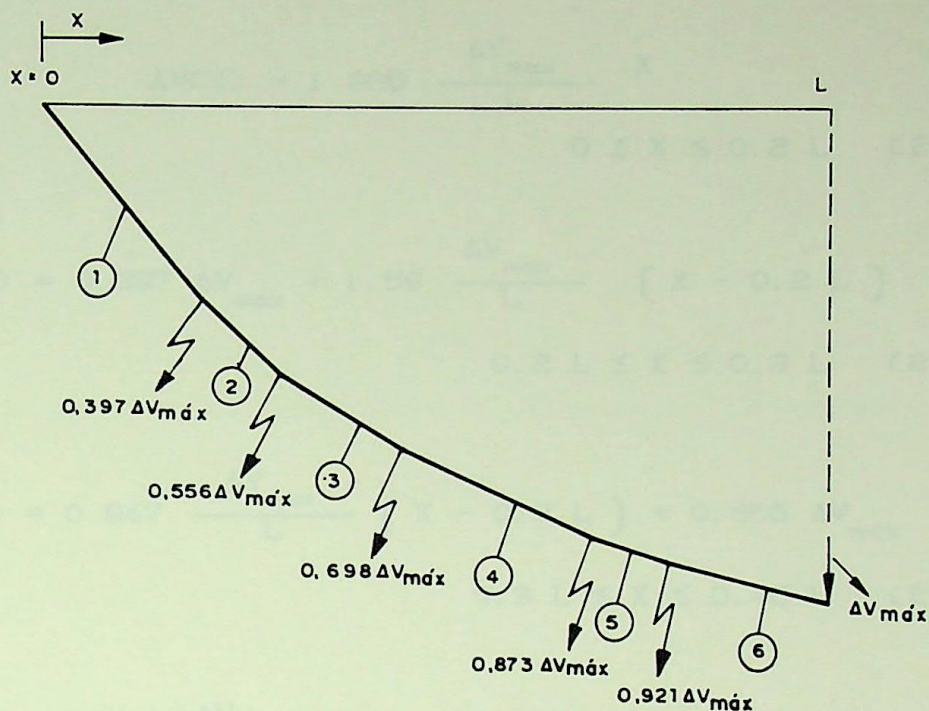


Fig. 2.24 - Perfil de Queda de Tensão.

A Alocação de Capacitores para Obter Queda de Tensão Zero nos Pontos de Carga

Procedendo-se de forma similar aos contemplados nos itens anteriores, obtém-se o perfil de queda de tensão de forma tal que a queda de tensão seja zero no ponto de carga. O esquema do perfil de queda de tensão é mostrado na Fig. 2.25.

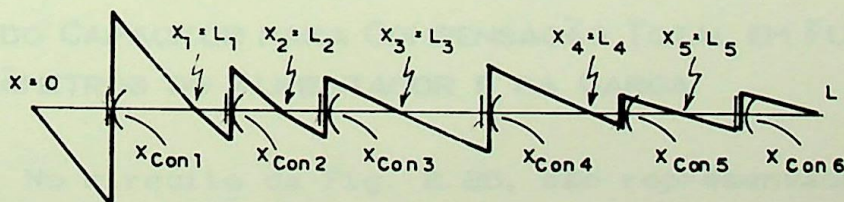


Fig. 2.25 - Perfil de Queda de Tensão com Capacitores Alocados de Forma a Ter-se Queda de Tensão Nula no Ponto de Carga.

Equações:

$$\Delta V(X) = 1.985 \frac{\Delta V_{\max}}{L} X \quad 0 \leq X \leq 0.2 L \quad (2.54)$$

$$\Delta V(X) = 0.397 \Delta V_{\max} + 1.59 \frac{\Delta V_{\max}}{L} (X - 0.2 L) \quad 0.2 L \leq X \leq 0.3 L \quad (2.55)$$

$$\Delta V(X) = 0.947 \frac{\Delta V_{\max}}{L} (X - 0.3 L) + 0.556 \Delta V_{\max} \quad 0.3 L \leq X \leq 0.45 L \quad (2.56)$$

$$\Delta V(X) = 0.7 \frac{\Delta V_{\max}}{L} (X - 0.45 L) + 0.698 \Delta V_{\max} \quad 0.45 L \leq X \leq 0.7 L \quad (2.57)$$

$$\Delta V(X) = 0.48 \frac{\Delta V_{\max}}{L} (X - 0.7 L) + 0.873 \Delta V_{\max} \quad 0.7 L \leq X \leq 0.8 L \quad (2.58)$$

$$\Delta V(X) = 0.395 \frac{\Delta V_{\max}}{L} (X - 0.8 L) + 0.921 \Delta V_{\max} \quad 0.8 L \leq X \leq L \quad (2.59)$$

## 2.2 - CÁLCULO DO CAPACITOR PARA COMPENSAÇÃO TOTAL EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DO ALIMENTADOR E DA CARGA

No circuito da Fig. 2.26, são representados os parâmetros do alimentador, capacitor e carga (caso de impedância estática).

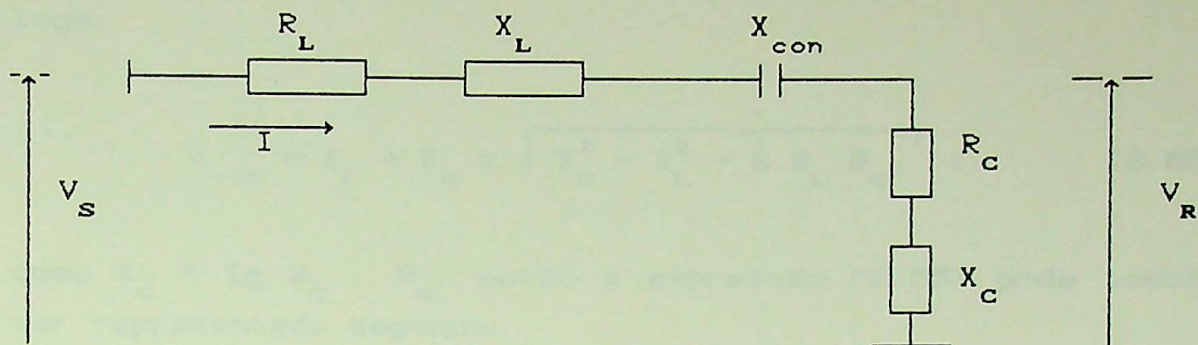


Fig. 2.26 - Circuito para o Cálculo do Capacitor.

Aqui:

$$|\bar{I}| = \frac{|\bar{V}_S|}{\sqrt{(R_L + R_C)^2 + (X_L + X_C - X_{con})^2}} \quad (2.60)$$

mas:

$$|\bar{V}_R| = |\bar{Z}_C| |\bar{I}| \quad (2.61)$$

$$|\bar{Z}_C| = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \quad (2.62)$$

logo, (2.60) em (2.61)

$$|\bar{V}_R| = |\bar{Z}_C| \frac{|\bar{V}_S|}{\sqrt{(R_L + R_C)^2 + (X_L + X_C - X_{con})^2}} \quad (2.63)$$

Para compensação total, isto é  $|\bar{V}_R| = |\bar{V}_S|$ , logo colocando (2.62) em (2.63) tem-se:

$$\sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{(R_L + R_C)^2 + (X_L + X_C - X_{con})^2} \quad (2.64)$$

logo:

$$X_{con} = X_L + X_C \pm \sqrt{X_C^2 - R_L^2 - 2 R_L R_C} \quad (2.65)$$

como  $X_C = \text{Tg } \phi_C \cdot R_C$ , então a expressão (2.65) pode também ser representada segundo:

$$X_{con} = X_L + R_C \text{tg } \phi_C \pm \sqrt{R_C^2 \text{tg}^2 \phi_C - R_L^2 - 2 R_L R_C} \quad (2.66)$$

Desta última relação destacam-se as observações a seguir:

- a) Existem dois valores de capacitâncias para a compensação total. Nas Fig. 2.27 e 2.28, tem-se representados os valores maior e menor do capacitor em função do ângulo do fator de potência da carga (bitola  $107.22 \text{ mm}^2$ ,  $R_C = 1200 \Omega$  para diferentes comprimentos do alimentador). Observa-se que enquanto o valor maior da reatância capacitiva que aumenta na faixa de  $0-2000 \Omega$ , incrementa-se o ângulo  $\phi_C$  ( $0-40^\circ$ ) (vide Fig. 2.27). Mas, com o valor menor do capacitor acontece o contrário e diminui de  $90 \Omega$  a  $0$ , e neste caso tem muita influência o comprimento do alimentador (vide Fig. 2.28).
- b) A potência reativa do capacitor ( $Q_{con}$ ) e a tensão no capacitor ( $V_{con}$ ) também aumenta ( $Q_{con}$  de 1 a 40 Var e  $V_{con}$  de 10 a 400 V) no caso do capacitor maior quando muda o ângulo de fator de potência (vide Fig. 2.29 para o caso da bitola e carga da observação a), acontecendo uma diminuição no capacitor menor ( $Q_{con}$  de 0.5 a 0.01 Var e  $V_{con}$  de 0.24 a 0.05 V) (vide Fig. 2.30).

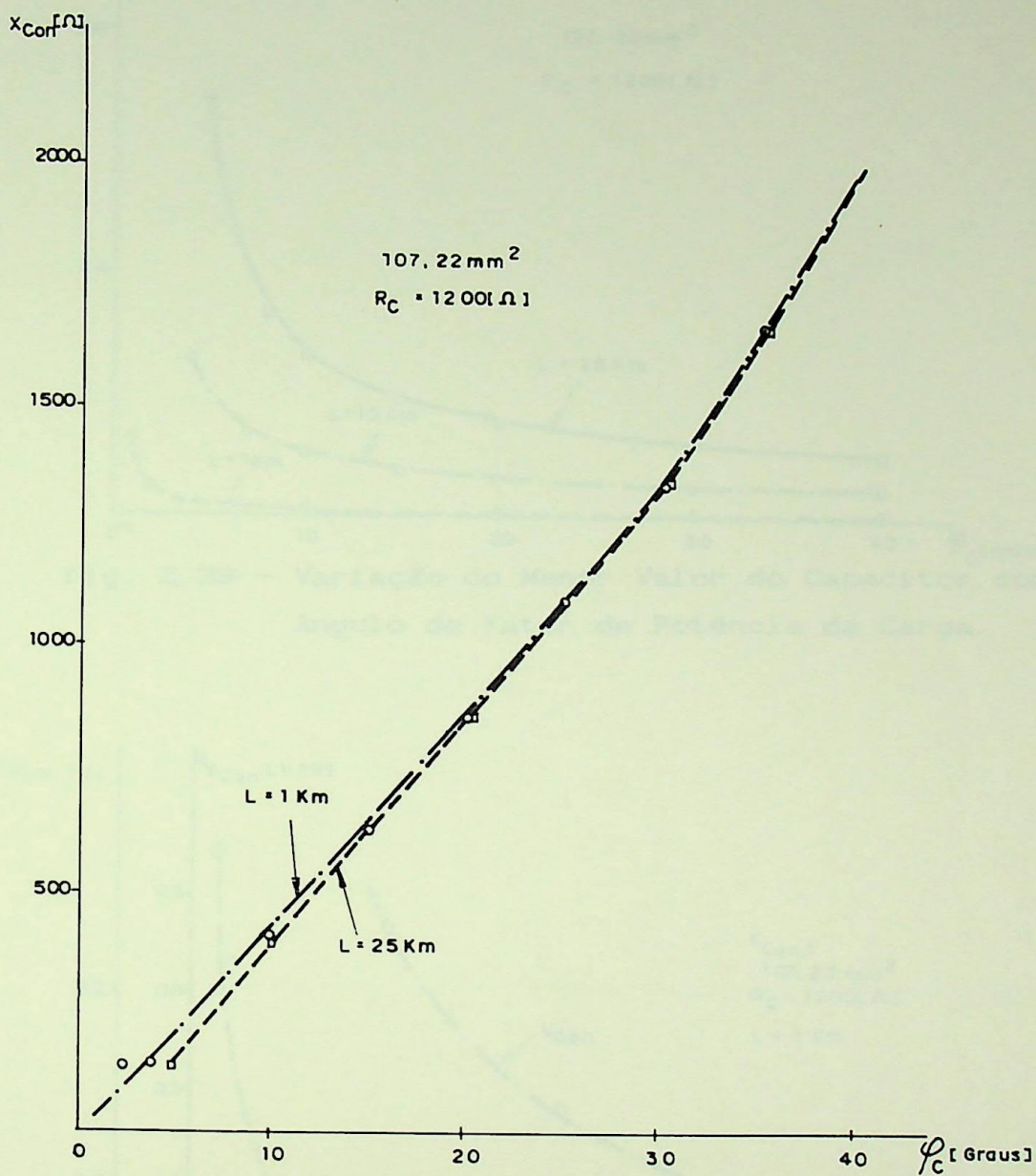


Fig. 2.27 - Variação do Maior Valor do Capacitor com o Ângulo de Fator de Potência da Carga.

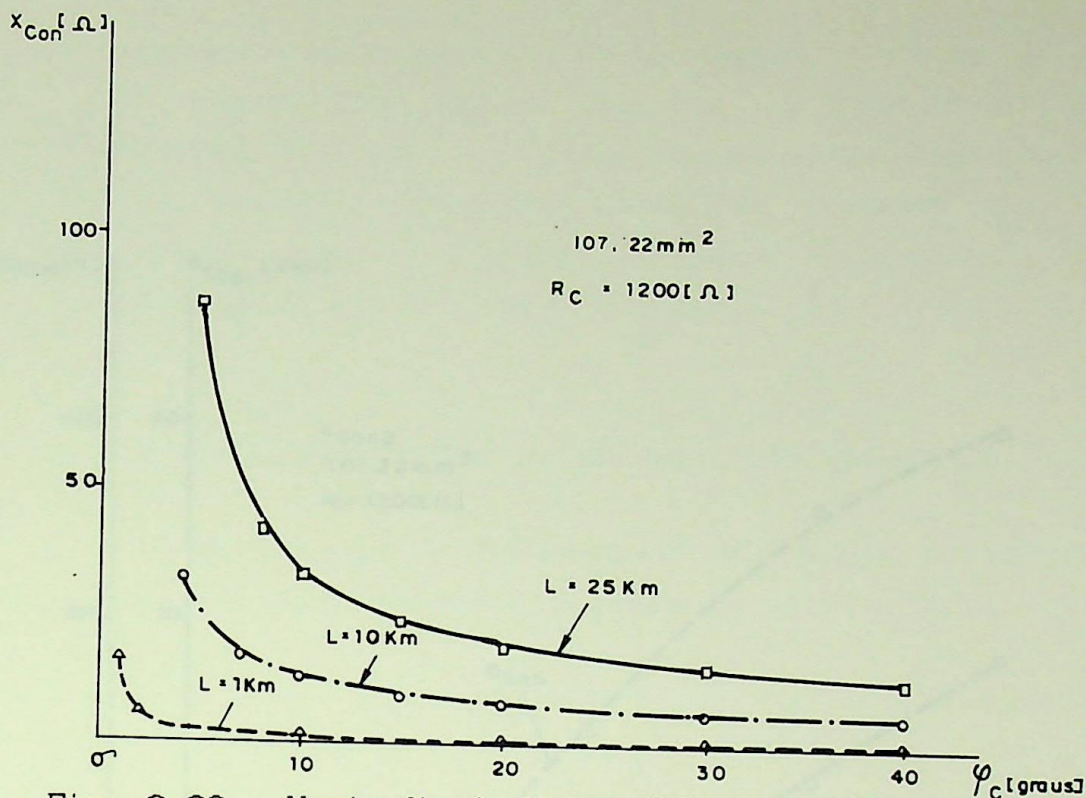


Fig. 2.28 - Variação do Menor Valor do Capacitor com o Ângulo de Fator de Potência da Carga.

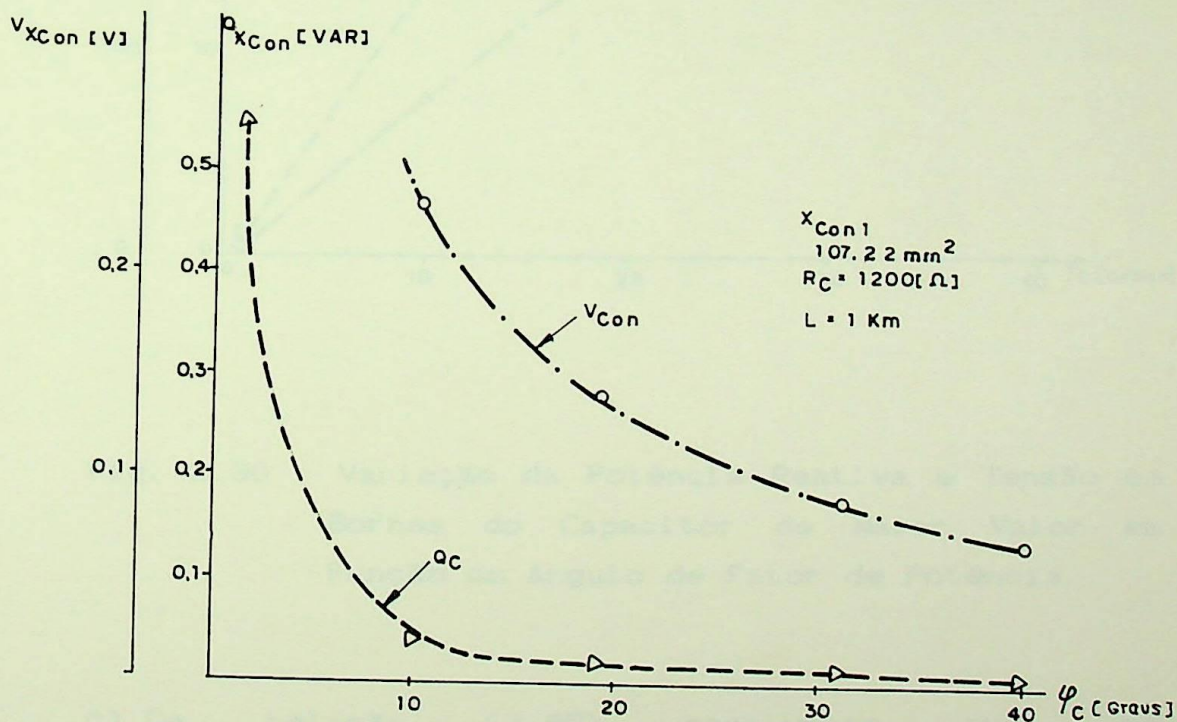


Fig. 2.29 - Variação da Potência Reativa e Tensão em Bornes do Capacitor do Menor Valor em Função do ângulo de Fator de Potência.

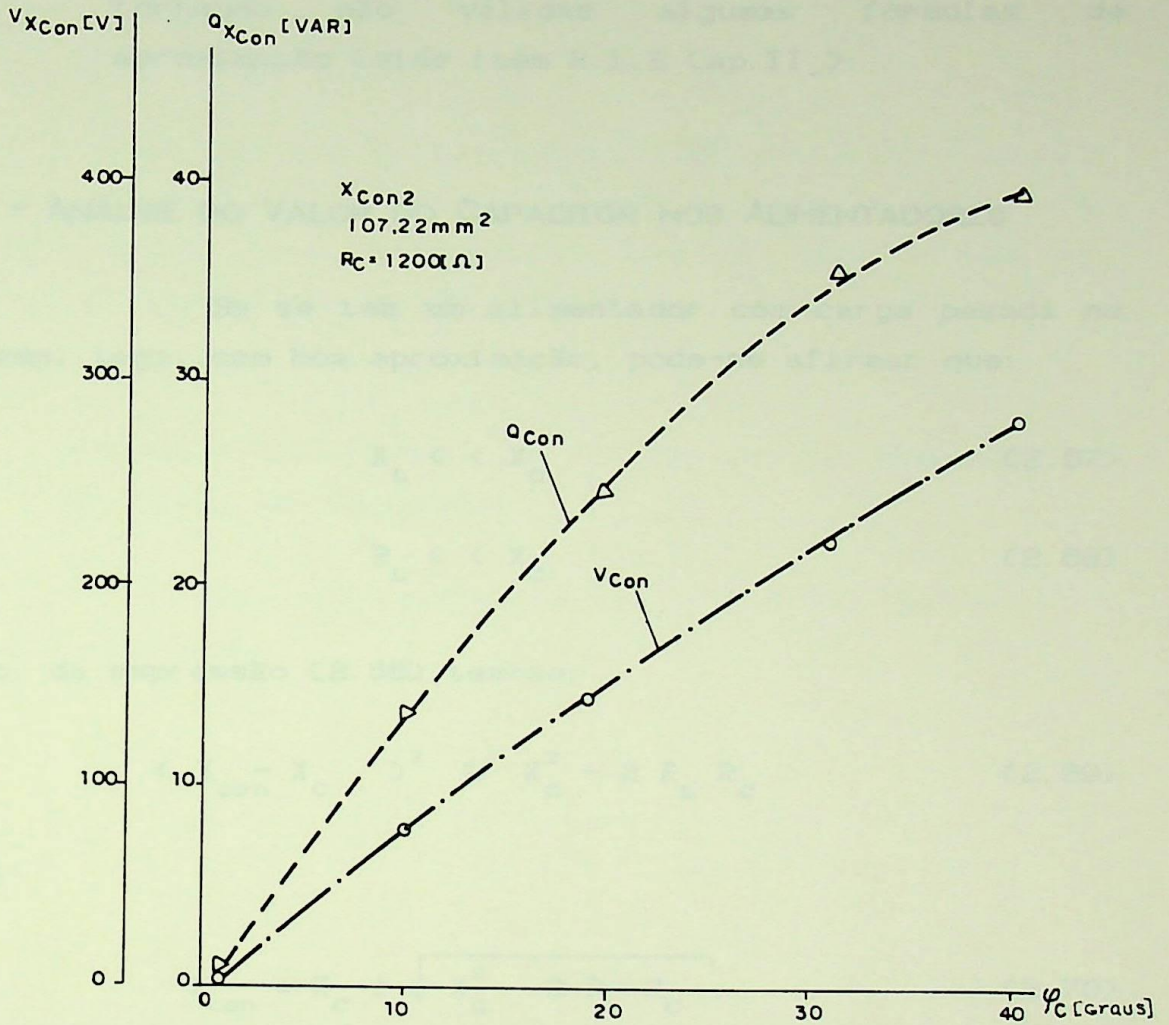


Fig. 2.30 - Variação da Potência Reativa e Tensão em Bornes do Capacitor de Maior Valor em Função do ângulo de Fator de Potência.

c) Da relação (2.65) conclue-se que, se  $R^2L + 2RL \cdot RC > X_C^2$ , então não haverá compensação. Assim, destaca-se o caso em que  $X_C = 0$  (caso de carga resistiva pura) não se poderá obter compensação.

- d) Dependendo dos parâmetros da carga, o valor maior do capacitor poderá tornar o circuito do alimentador capacitivo. Uma consequência deste fato é a grande defasagem entre as tensões  $V_S$  e  $V_R$  tornando não válidas algumas fórmulas de aproximação (vide item 2.1.2 Cap. II).

## 2.2.1 - ANÁLISE DO VALOR DO CAPACITOR NOS ALIMENTADORES

Se se tem um alimentador com carga pesada no extremo, logo, com boa aproximação, pode-se afirmar que:

$$X_L \ll X_C \quad (2.67)$$

$$R_L \ll X_C \quad (2.68)$$

Então, da expressão (2.65) tem-se:

$$(X_{con} - X_C)^2 \cong X_C^2 - 2 R_L R_C \quad (2.69)$$

daqui:

$$X_{con} = X_C \pm \sqrt{X_C^2 - 2 R_L R_C} \quad (2.70)$$

como:

$$X_C^2 > 2 R_L R_C \quad (2.71)$$

e sabendo que:

$$\operatorname{tg} \phi_C = \frac{X_C}{R_C} \quad (2.72)$$

Substituindo (2.71) em (2.72) obtém-se:

$$\operatorname{tg}^2 \phi_C > 2 \frac{R_L}{R_C} \quad (2.73)$$

e daqui pode-se obter

$$\cos \varphi_c < \frac{1}{\sqrt{1 + 2 \left( \frac{R_L}{R_C} \right)}} \quad (2.74)$$

É dizer que sob as condições (2.67) e (2.68) impostas a fator e potência da carga deverá satisfazer a relação anterior (2.74) para obter os valores dos capacitores que permitam a compensação do alimentador.

## 2.2.2 - VARIAÇÃO DA TENSÃO NA CARGA COM A MUDANÇA DA REATÂNCIA DO CAPACITOR

Das expressões (2.62) e (2.63) obtém-se a seguinte expressão

$$V_R = \sqrt{\frac{R_C^2 + X_C^2}{(R_L + R_C)^2 + (X_L + X_C - X_{con})^2}} V_s \quad (2.75)$$

Na Fig. 2.31 é mostrado o comportamento da tensão  $V_R$  segundo a expressão (2.75) para um caso específico de uma impedância estática de  $RC = 180 \text{ } [\Omega]$  e  $X_C = 85 \text{ } [\Omega]$  e comprimento de 1 [km].

## 2.3 - CÁLCULO DO CAPACITOR PARA COMPENSAÇÃO TOTAL DE CARGAS ATIVAS EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO ALIMENTADOR E DA POTÊNCIA DA CARGA

No circuito da Fig. 2.25, a tensão nominal do alimentador é  $V_s = 10 \text{ kV}$  e a potência da carga é  $P_c = 10 \text{ MW}$ .

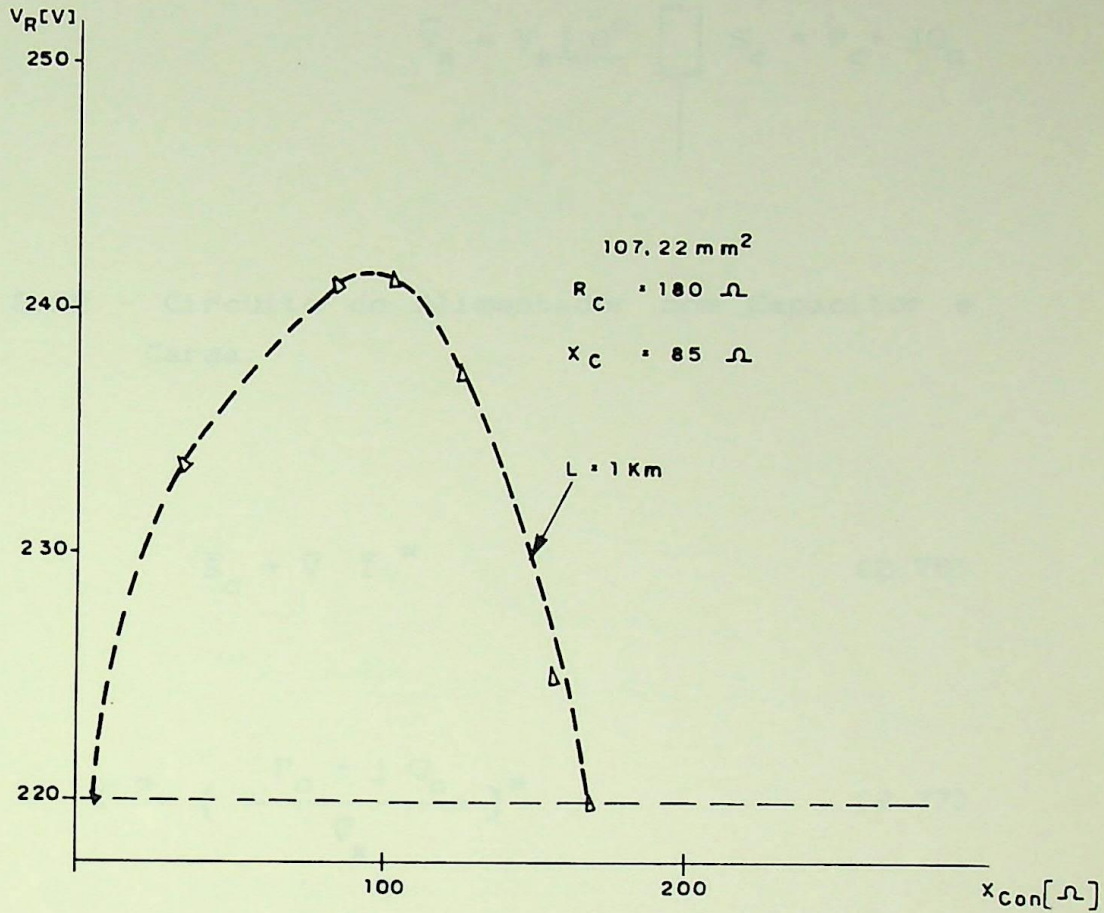


Fig. 2.31 - Comportamento da Tensão em Bornes da Carga em Função da Reatância do Condensador.

### 2.3 - CÁLCULO DO CAPACITOR PARA COMPENSAÇÃO TOTAL DE CARGAS ATIVAS EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO ALIMENTADOR E DA POTÊNCIA DA CARGA

No circuito da Fig. 2.32, tem-se representado os parâmetros do alimentador, o capacitor e a potência da carga.

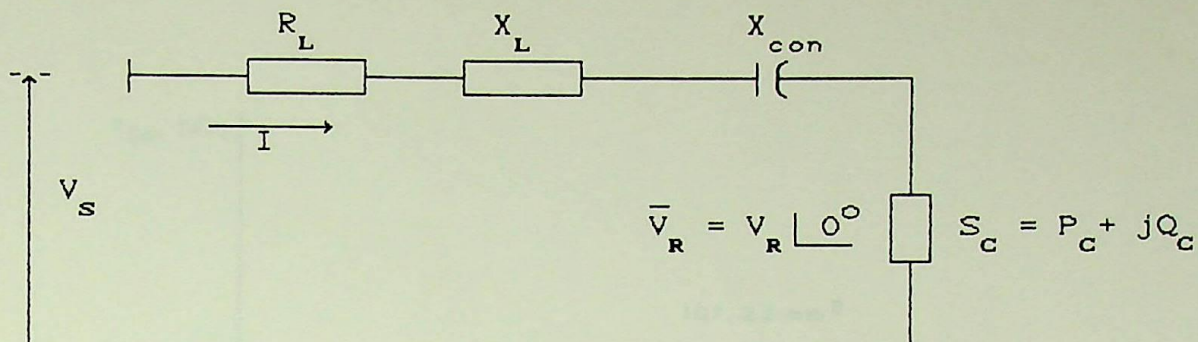


Fig. 2.32 - Circuito do Alimentador com Capacitor e Carga.

De:

$$\bar{S}_C = \bar{V} \bar{I}^* \quad (2.76)$$

logo tem-se:

$$\bar{I}^* = \left( \frac{P_C + j Q_C}{\bar{V}_R} \right)^* \quad (2.77)$$

mas:

$$(P_C + j Q_C)^* = P_C - j Q_C \quad e \quad (2.78)$$

$$\bar{V}_R^* = \bar{V}_R \quad (2.79)$$

Logo obtém-se a queda de tensão da expressão seguinte.

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_S - \bar{V}_R \quad (2.80)$$

Do circuito obtém-se:

$$\Delta \bar{V} = \bar{I} (R_L + j X_L - j X_{con}) \quad (2.81)$$

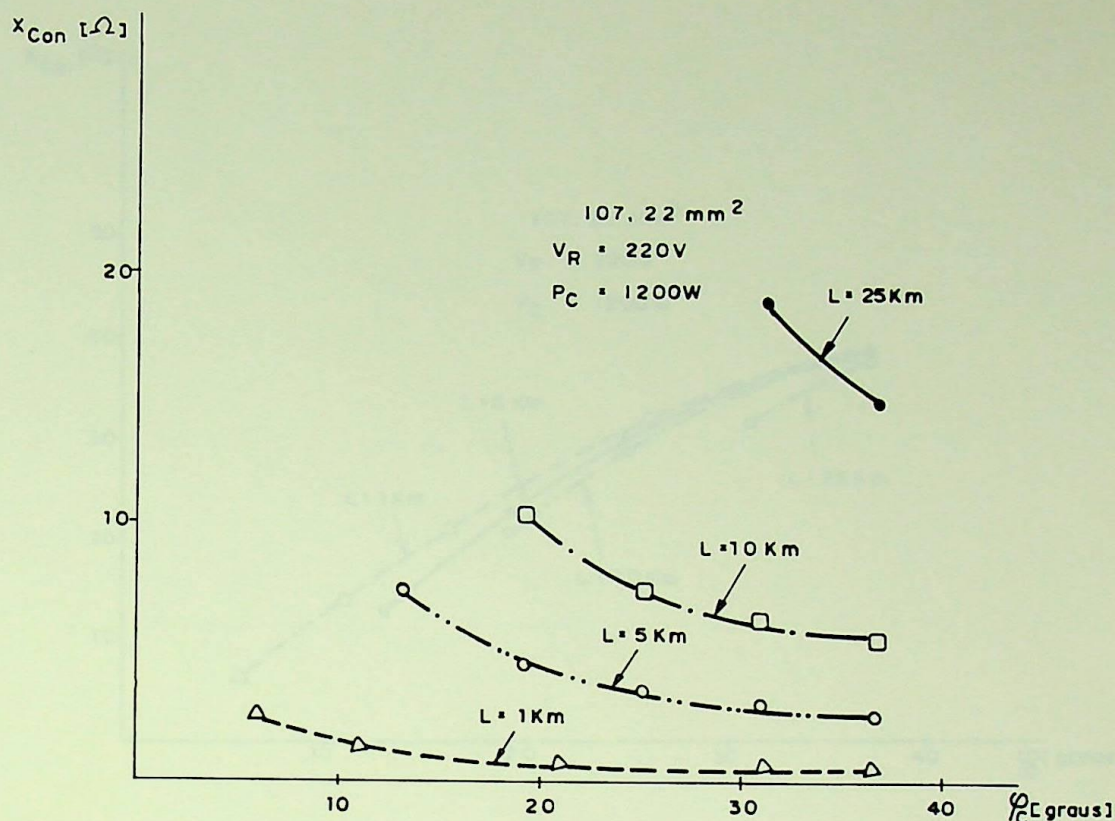


Fig. 2.33 - Valores de Capacitor Maior para Compensação Total Quando Altera-se o Fator de Potência da Carga.

Substituindo (2.65) em (2.69)

$$\Delta \bar{V} = \left( \frac{P_C - j Q_C}{V_R} \right) (R_L + j X_L - j X_{con}) \quad (2.82)$$

daqui:

$$\begin{aligned}
 V_S - V_R = & \left[ \frac{(P_C R_L + Q_C X_L) - Q_C X_{con}}{V_R} \right] + \\
 & + j \left[ \frac{(P_C X_L - Q_C R_L) - P_C X_{con}}{V_R} \right] \quad (2.83)
 \end{aligned}$$

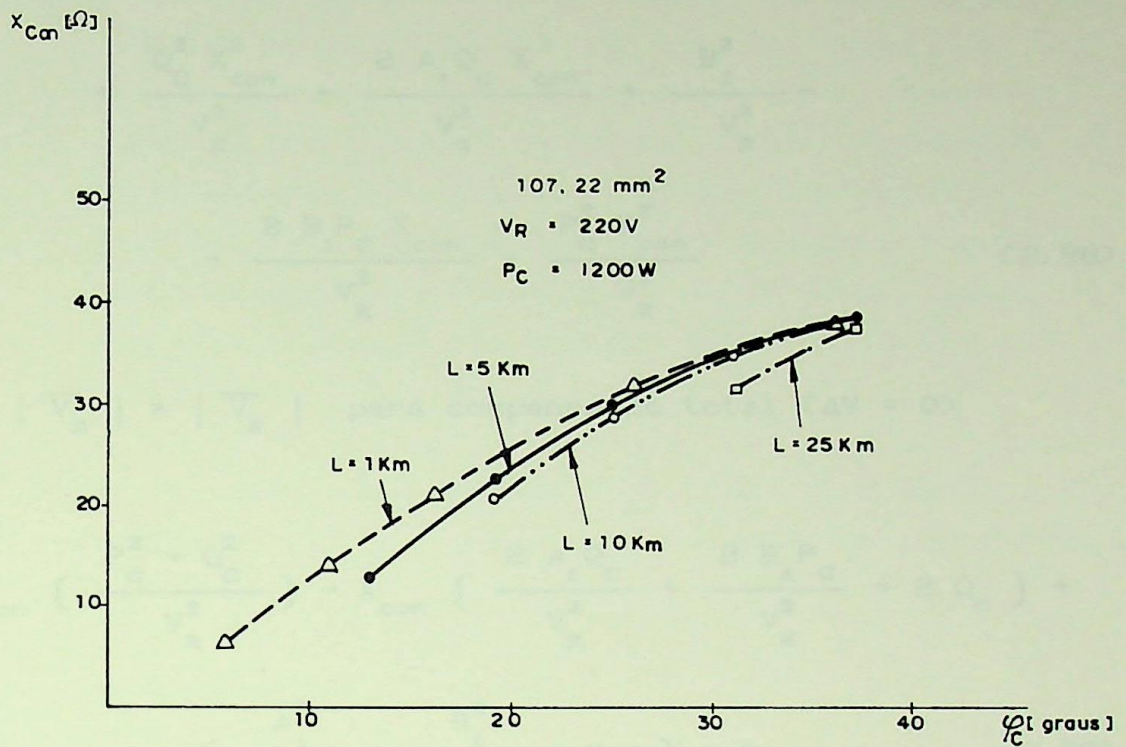


Fig. 2.34 - Valores de Capacitor Menor para Compensação Total em Função do Ângulo de Fator de Potência da Carga.

Fazendo:

$$A_1 = P_C R_L + Q_C X_L \quad (2.84)$$

$$B_1 = P_C X_L - Q_C R_L \quad (2.85)$$

E como:

$$V_R = V_R \angle 0^\circ \quad (2.86)$$

Substituindo (2.72), (2.73) em (2.71) obtém-se:

$$\bar{V}_S = \left( V_R + \frac{A_1 - Q_C X_{con}}{V_R} \right) + j \left( \frac{B_1 - P_C X_{con}}{V_R} \right) \quad (2.87)$$

daqui:

$$\begin{aligned}
V_S^2 &= V_R^2 + 2 A_1 - 2 Q_C X_{con} + \frac{A_1^2}{V_R^2} + \\
&+ \frac{Q_C^2 X_{con}^2}{V_R^2} - \frac{2 A_1 Q_C X_{con}}{V_R^2} + \frac{B_1^2}{V_R^2} - \\
&- \frac{2 B_1 P_C X_{con}}{V_R^2} + \frac{P_C^2 X_{con}^2}{V_R^2} \quad (2.88)
\end{aligned}$$

como  $|\overline{V}_S| = |\overline{V}_R|$  para compensação total ( $\Delta V = 0$ )  
logo:

$$\begin{aligned}
X_{con}^2 \left( \frac{P_C^2 + Q_C^2}{V_R^2} \right) - X_{con} \left( \frac{2 A_1 Q_C}{V_R^2} + \frac{2 B_1 P_C}{V_R^2} + 2 Q_C \right) + \\
+ \left( \frac{A_1^2}{V_R^2} + \frac{B_1^2}{V_R^2} + 2 A_1 \right) = 0 \quad (2.89)
\end{aligned}$$

com a solução:

$$X_{con} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2A_1} \quad (2.90)$$

onde:

$$a = \frac{P_C^2 + Q_C^2}{V_R^2} \quad (2.91)$$

$$b = - \left[ \frac{2 X_L}{V_R^2} (P_C^2 + Q_C^2) + 2 Q_C \right] \quad (2.92)$$

$$c = \left( \frac{R_L^2 + X_L^2}{V_R^2} \right) (P_C^2 + Q_C^2) + 2 (P_C X_L + Q_C X_L) \quad (2.93)$$

Pode-se destacar algumas observações:

- a) Nas Figs. 2.33 e 2.34 estão representados os lugares geométricos dos valores do capacitor  $X_{con}$  (maior e menor correspondentes) para compensação total de uma bitola  $107.22 \text{ mm}^2$ ,  $V=220$ ,  $P_c=1200 \text{ W}$  e para diferentes comprimentos de alimentador. Um fato interessante é observar que quando o ângulo do fator de potência diminui um certo valor, então já não existirá mais compensação total (vide Fig. 2.33,  $l \text{ [km]}$ ,  $\varphi = 6^\circ$ ).
- b) A variação da tensão ( $V_R$ ) com a mudança do capacitor ( $X_{con}$ ) pode ser obtida da expressão (2.77).

Arranjando (2.77) tem-se:

$$V_R^4 + V_R^2 \left( 2 A_1 - 2 Q_c X_{con} - V_S^2 \right) + \left[ X_{con}^2 \left( P_c^2 + Q_c^2 \right) - X_{con} \left( 2 A_1 Q_c + 2 B_1 P_c \right) + A_1^2 + B_1^2 \right] \quad (2.94)$$

com a solução:

$$V_R = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}}$$

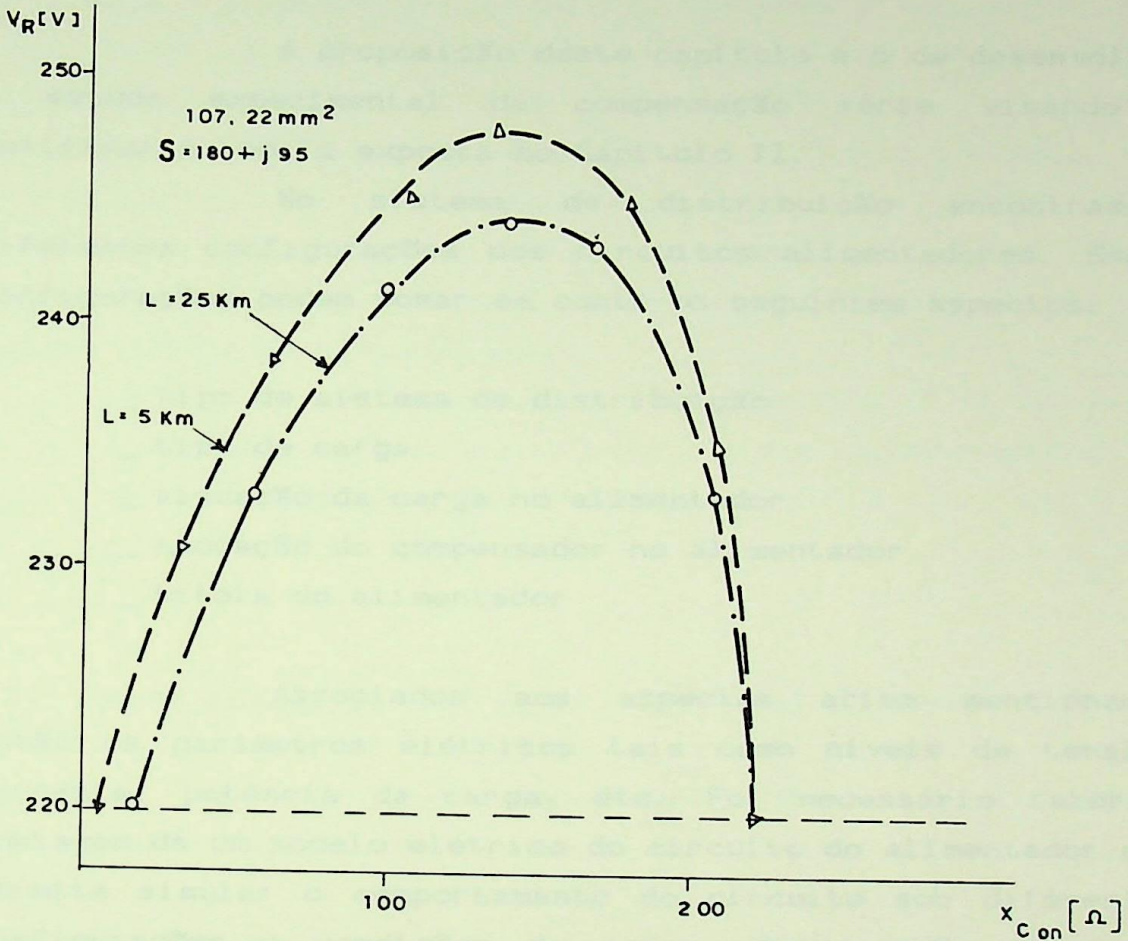
onde:

$$a = 1 \quad (2.95)$$

$$b = 2 A_1 - 2 Q_c X_{con} - V_S^2 \quad (2.96)$$

$$c = X_{con}^2 \left( P_c^2 + Q_c^2 \right) - X_{con} \left( 2 A_1 Q_c + 2 B_1 P_c \right) + A_1^2 + B_1^2 \quad (2.97)$$

Na Fig. 2.35 mostra-se o caso específico de uma carga  $S = 180 + j 95$ , para uma bitola  $107.22 \text{ mm}^2$  e para comprimentos do alimentador de 5 [km] e 25 [km].



$\Delta$  - L = 25 km

$\circ$  - L = 5 km

Fig. 2.35 - A Tensão em Bornes da Carga em Função da Reatância do Capacitor.

## CAPÍTULO III

### ESTUDO EXPERIMENTAL DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

A proposição deste capítulo é o de desenvolver o estudo experimental da compensação série visando a verificar a teoria exposta no Capítulo II.

No sistema de distribuição encontram-se diferentes configurações dos circuitos alimentadores. Essas configurações podem tomar em conta os seguintes aspectos:

- \_ tipo de sistema de distribuição
- \_ tipo de carga
- \_ alocação da carga no alimentador
- \_ alocação do compensador no alimentador
- \_ bitola do alimentador

Associados aos aspectos acima mencionados estão os parâmetros elétricos tais como níveis de tensão, corrente, potência da carga, etc. Foi necessário fazer a montagem de um modelo elétrico do circuito do alimentador que permita simular o comportamento do circuito sob diferentes configurações e condições de carga, compensação, etc. Os detalhes construtivos, de montagem e as especificações dos componentes do banco de testes são mostrados no Apêndice D. A flexibilidade dos componentes do banco permite realizar simulações dos circuitos dos alimentadores para sustentar, avaliar e complementar a teoria exposta.

Os casos de compensação ensaiados no banco de testes são com cargas de impedâncias estáticas e ativas. Destacam-se ensaios de compensação em cargas com diferentes fatores de potência (alto e baixo), determinação experimental do capacitor para compensação total, traçado experimental de perfis de tensão, diagramas fasoriais e curvas experimentais

características do capacitor quando muda o fator de potência da carga.

### 3.2 - DESCRIÇÃO GERAL DO BANCO DE TESTES

O banco é composto por resistências fixas e variáveis, indutâncias fixas e variáveis e banco de capacitores e, também, uma instrumentação de medição associada (vide Apêndice D).

Cada componente do banco simula o comportamento de um componente da rede de distribuição constituída pelo alimentador, compensador e carga. Este último componente da rede pode ser simulada por uma impedância estática ou um motor.

O banco de testes apresenta muitas facilidades para configurar diferentes circuitos dos alimentadores da rede. Essas configurações tomam em conta os aspectos considerados no item 3.1.

### 3.3 - PROCEDIMENTO SEGUIDO PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento experimental tem o seguinte procedimento:

- a) Determinação e medição dos parâmetros dos componentes do circuito de alimentação, como resistências e reatâncias do alimentador e carga e a reatância do compensador.
- b) Conferência das ligações.
- c) Montagem do banco de testes segundo os esquemas dos circuitos mostrados nas Figs. 3.1 e 3.2.

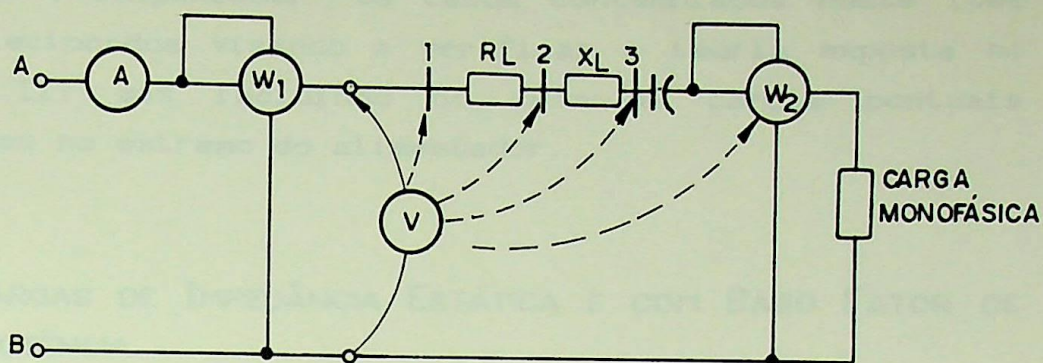


Fig. 3.1 - Esquema da Montagem do Circuito para Testes de Cargas Monofásicos.

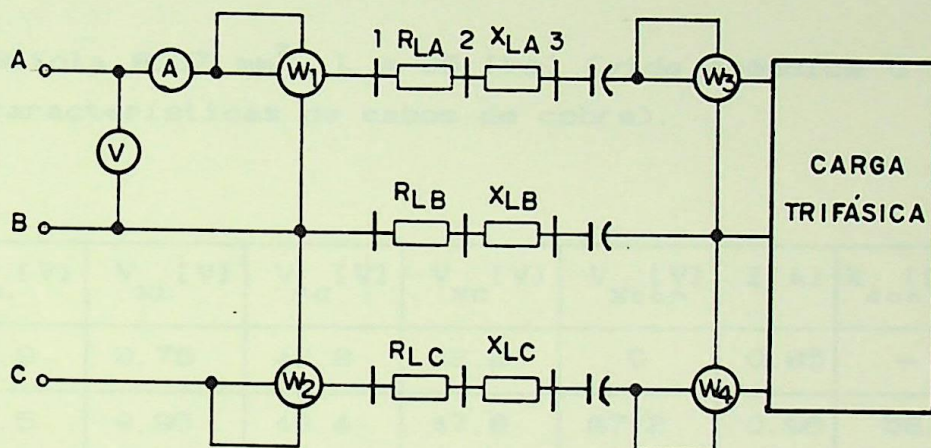


Fig. 3.2 - Esquema da Montagem do Circuito para o Caso de Testes de Cargas Trifásicas.

- d) Finalmente, realiza-se a medição da corrente e tensão em cada componente, e da potência ativa do conjunto e da carga.

### 3.4 - ENSAIOS REALIZADOS

O banco de testes permite fazer experimentos considerando a possibilidade de mudar o cabo do alimentador,

a carga e o compensador. Os casos contemplados neste item foram selecionados visando a verificar a teoria exposta no capítulo II, mas incidindo no caso de cargas pontuais localizados no extremo do alimentador.

### 3.4.1 - CARGAS DE IMPEDÂNCIA ESTÁTICA E COM BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

Caso I

\_ Alocação do capacitor no extremo final do alimentador.

\_ Bitola 8.37 mm<sup>2</sup>, L = 25 [km] (vide Apêndice C para características de cabos de cobre).

V <sub>S</sub> [V]	V <sub>R</sub> [V]	V <sub>RL</sub> [V]	V <sub>XL</sub> [V]	V <sub>RC</sub> [V]	V <sub>XC</sub> [V]	V <sub>Xcon</sub> [V]	I [A]	X <sub>con</sub> [Ω]	C [μF]
110	64.6	49.9	8.75	42.8	42.2	0	0.85	—	—
110	73.5	51.5	9.95	48.4	47.8	67.2	0.96	68.6	38.67
110	34.5	25.0	4.64	23.2	22.5	126.4	0.45	277.8	9.56

a, b, c → Ensaios considerados no diagrama fasorial mostrado

Tabela 3.1 - Valores Experimentais

\_ Obtenção dos parâmetros do circuito (da Tabela 3.1)

$$R_L = 53.33 [\Omega], \quad R_C = 50.5 [\Omega]$$

$$X_L = 10.33 [\Omega], \quad X_C = 49.7 [\Omega]$$

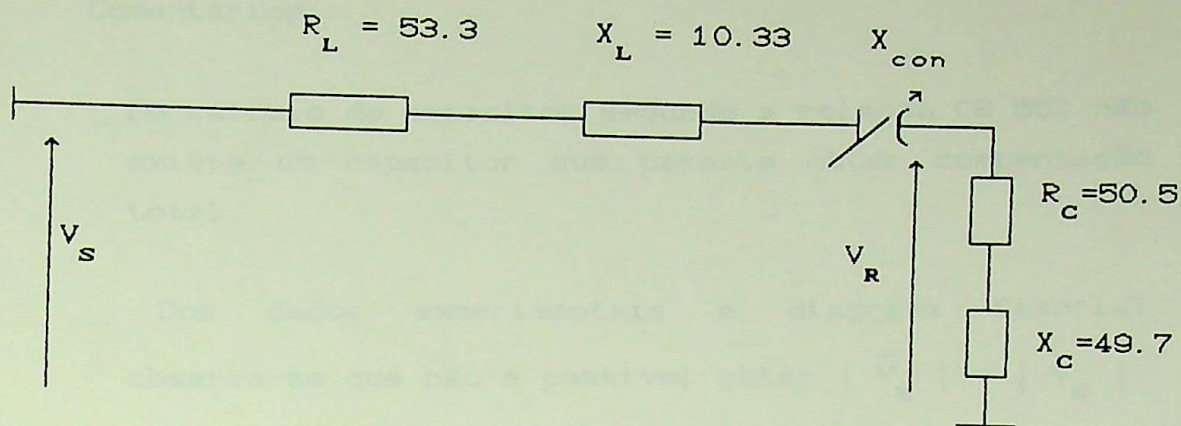


Fig. 3.3 - Circuito do Alimentado para o Caso de Circuito Monofásico

Da relação (2.65) aqui reescrita:

$$X_{con} = X_L + X_C \pm \sqrt{X_C^2 - R_L^2 - 2R_L R_C}$$

vem:

$$X_{con} = 10.33 + 49.7 \pm \sqrt{49.7^2 + 53.33^2 - 2 \times 53.3 \times 50.5}$$

$$X_{con} = 60.03 \pm \sqrt{-5754} = 60.03 \pm j76$$

sendo complexos não haverá compensação.

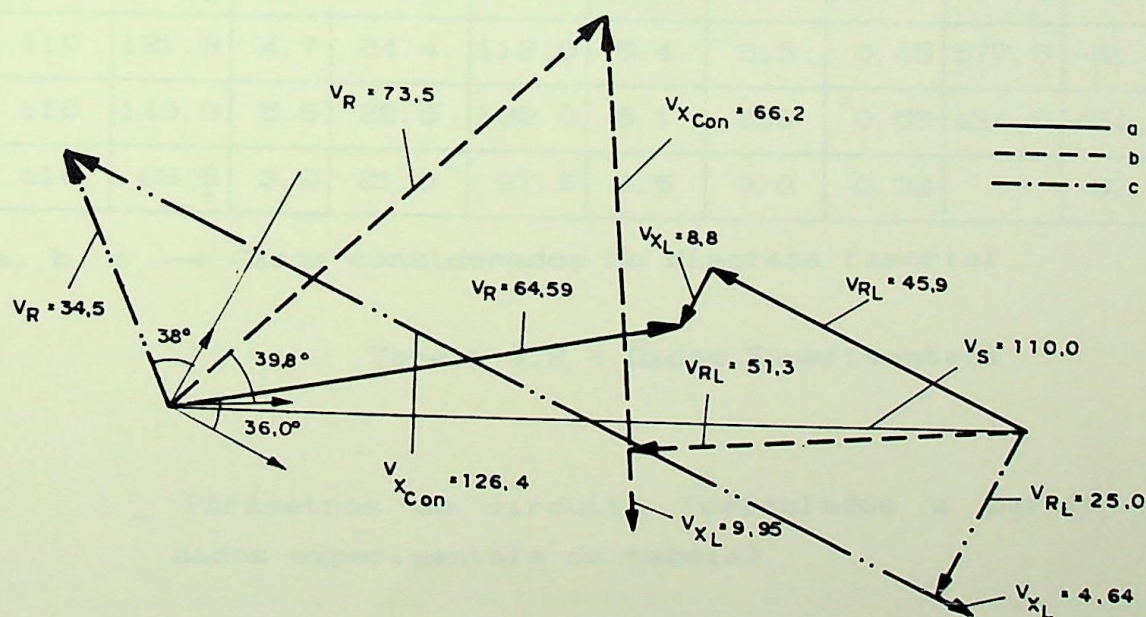


Fig. 3.4 - Diagrama Fasorial (Caso I)

Comentários:

- \_ Do cálculo do capacitor segundo a relação (2.65) não existe um capacitor que permite obter compensação total.
- \_ Dos dados experimentais e diagrama fasorial observa-se que não é possível obter  $|\bar{V}_R| = |\bar{V}_S|$ .

Caso II

- \_ Alocação do capacitor no extremo final do alimentador.
- \_ Bitola  $8.37 \text{ mm}^2$ ,  $L = 25 \text{ [km]}$ .

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{Xcon}$	$I$ [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]	$\theta$ [ $^\circ$ ]	$\phi_t$ [ $^\circ$ ]
12.5	110	81.3 <sub>a</sub>	3.3	17.3	80.0	3.8	183.	0.32	571.9	-69.	-68.5
21.0	110	113.4 <sub>b</sub>	4.4	23.0	112.2	5.1	206	0.42	490.5	-63	-62
24	110	121.3	4.7	24.4	112.0	5.4	215	0.45	577.5	-61.0	-60.5
33.5	110	140.6	5.5	28.5	139.0	6.1	229	0.53	434.5	-54.7	-54.6
16	110	98.5 <sub>c</sub>	3.9	21.0	97.5	4.6	0.0	0.38	-	67.5	65.6

a, b, c  $\rightarrow$  Casos considerados no diagrama fasorial

Tabela 3.2 - Dados Experimentais

- \_ Parâmetros do circuito (calculados a partir dos dados experimentais da tabela).

$$R_L = 54.4 \text{ [}\Omega\text{]}, \quad R_C = 66 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_L = 10.3 \text{ [}\Omega\text{]}, \quad X_C = 255 \text{ [}\Omega\text{]}$$

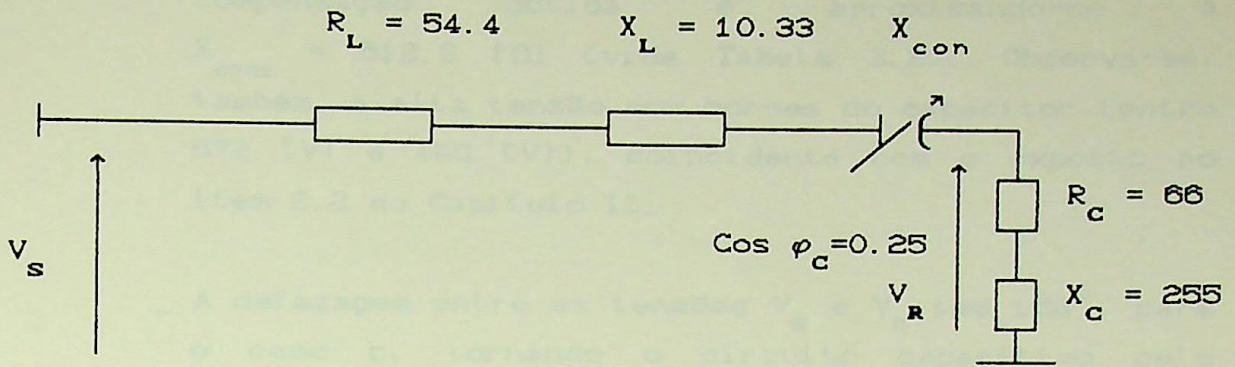


Fig. 3.5 - Circuito do Alimentador

Capacitores calculados:  $X_{con1} = 512.3 [\Omega]$ ,  
 $X_{con2} = 18.25 [\Omega]$

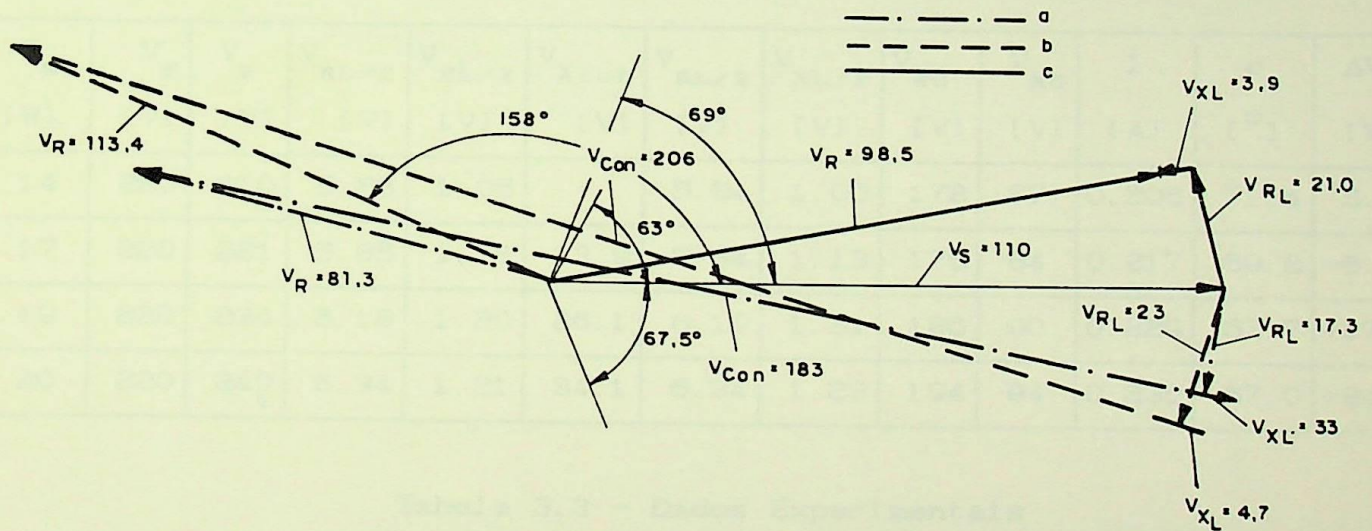


Fig. 3.6 - Diagrama Fasorial

Comentários:

\_ Do cálculo dos capacitores segundo a relação (2.65),  
 obtém-se os capacitores:  $X_{con1} = 512.3 [\Omega]$  e  
 $X_{con2} = 18.3 [\Omega]$  e, neste caso, observa-se que a

compensação obtida é aproximando-se a  $X_{con1} = 512.3 \text{ } [\Omega]$  (vide Tabela 3.2). Observa-se, também, a alta tensão nos bornes do capacitor (entre 572 [V] e 490 [V]), coincidente com o exposto no item 2.2 do Capítulo II.

- A defasagem entre as tensões  $V_S$  e  $V_R$  tem  $158^\circ$ , para o caso b, tornando o circuito capacitivo pelo adiantamento da corrente em relação à tensão  $V_S$  (vide Fig. 3.6).

### Caso III

- Alocação do capacitor no centro do alimentador.
- Bitola  $8.37 \text{ mm}^2$ ,  $L = 25 \text{ [km]}$ .

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL/2}$ [V]	$V_{XL/2}$ [V]	$V_{Xcon}$ [V]	$V_{RL/2}$ [V]	$V_{XL/2}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	I [A]	$\phi_t$ [ $^\circ$ ]	$\Delta V_t$ [V]
14	220	210 <sub>a</sub>	5.53	1.05	-	5.54	1.05	178	87	0.205	71.4	5.43
17	220	221	5.85	1.12	13.9	5.84	1.13	175	84	0.217	69.2	-6.89
19	220	234	6.18	1.20	26.1	6.19	1.21	186	90	0.229	67.7	-17.5
20	220	240 <sub>b</sub>	6.34	1.21	34.1	6.34	1.23	194	94	0.235	67.0	-24.2

Tabela 3.3 - Dados Experimentais

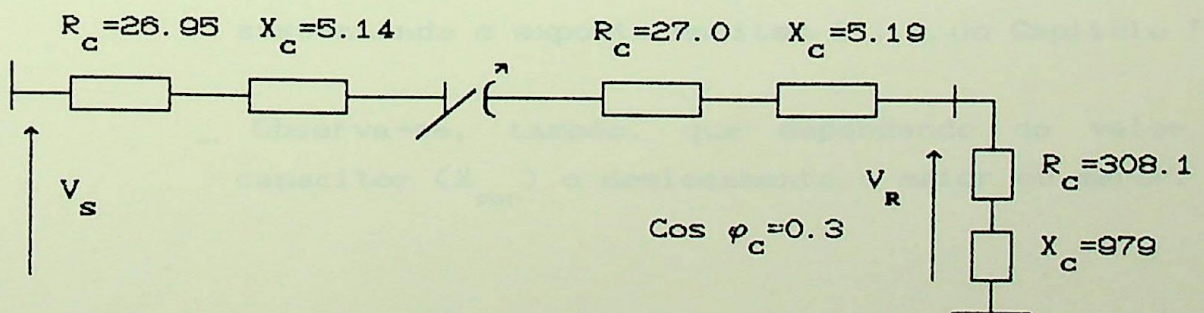


Fig. 3.7 - Circuito do Alimentador

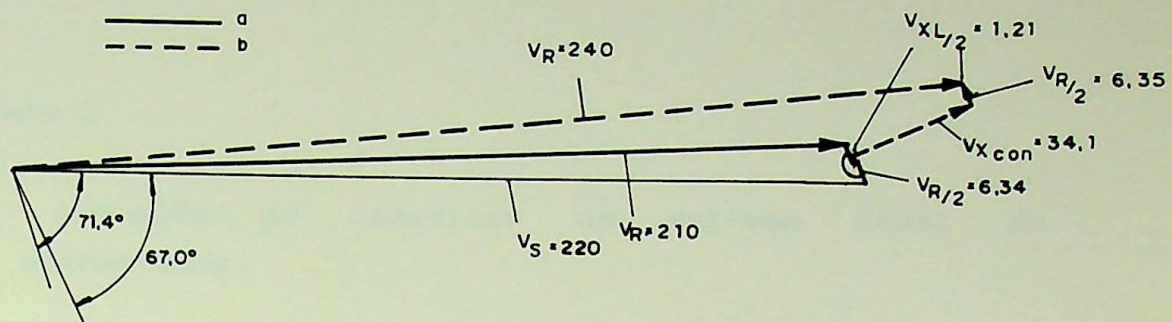


Fig. 3.8 - Diagrama Fasorial

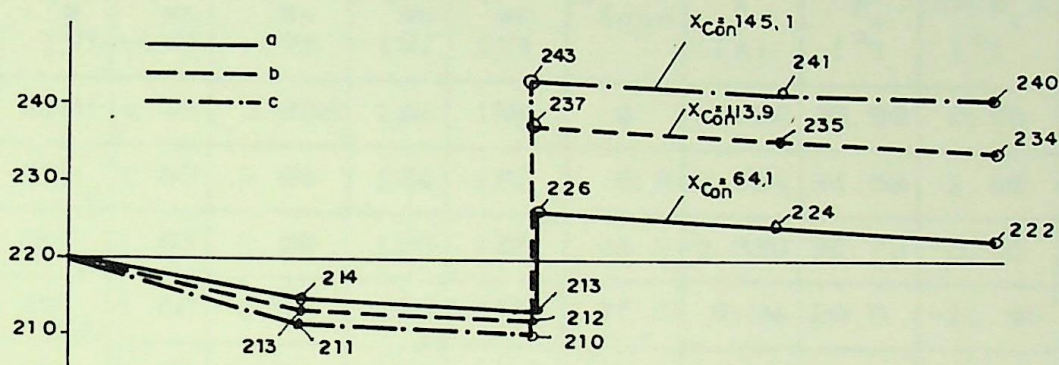


Fig. 3.9 - Perfil de Tensões

Comentários:

- \_ A alocação do capacitor no centro desloca o perfil de tensões no centro do alimentador (vide Fig. 3.9), sustentando o exposto no item 2.1.4 do Capítulo II.
- \_ Observa-se, também, que dependendo do valor do capacitor ( $X_{con}$ ) o deslocamento é maior ou menor.

### 3.4.2 - CARGAS DE IMPEDÂNCIA ESTÁTICA E COM ALTO FATOR DE POTÊNCIA

Caso I

\_ Alocação do capacitor no extremo final do alimentador.

\_ Bitola 107.22 mm<sup>2</sup>, L = 15 [km].

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{Xcon}$	I [A]	$\phi_t$ [°]	$\Delta V(\phi_t)$ [°]	$X_{con}$ [Ω]
55.2	220	218	1.48	0.832	122	158	0	0.32	35.59	0.78	-
56.4	220	221 <sub>a</sub>	1.50	0.84	124	160	5.3	0.324	34.63	-1.46	16.35
58.4	220	225 <sub>b</sub>	1.53	0.86	126	162	12.1	0.329	32.73	-5.00	36.78
62.1	220	231 <sub>c</sub>	1.60	0.88	129	167	27.3	0.34	29.5	-11.90	80.29
66.0	220	238	1.62	0.91	133	172	42.1	0.35	26.1	-16.99	120.3
75.5	220	252 <sub>d</sub>	1.74	0.97	142	183	89.6	0.374	15.16	-21.88	238.0

Tabela 3.4 - Dados Experimentais

\_ Da tabela:  $R_L = 2.6$  [Ω],  $X_L = 4.63$  [Ω]  
 $R_C = 536$  [Ω],  $X_C = 378$  [Ω]

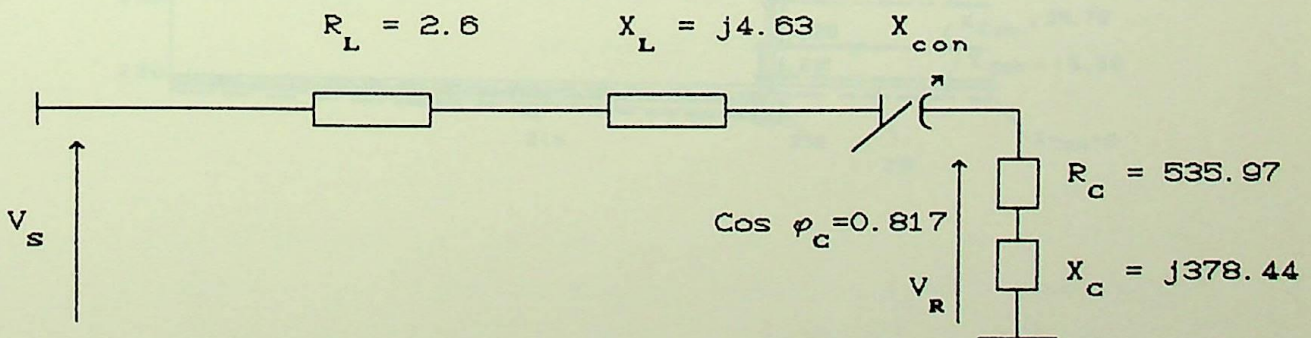


Fig. 3.10 - Circuito do Alimentador

Capacitores calculados para queda de tensão zero:

$$X_{con1} = 757.7 [\Omega]$$

$$X_{con2} = 8.9 [\Omega]$$

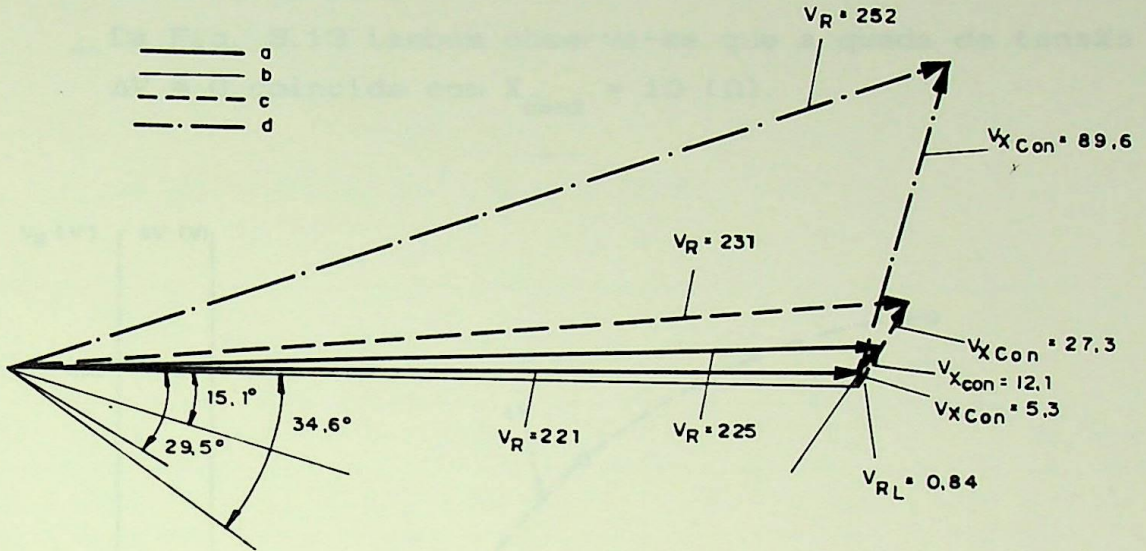


Fig. 3.11 - Diagrama Fasorial

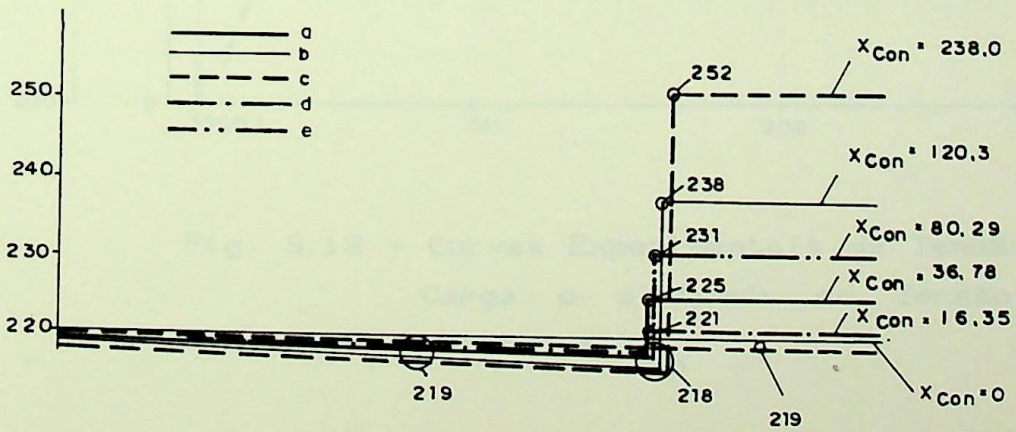


Fig. 3.12 - Perfil de Tensões

## Comentários:

- \_ O valor experimental do capacitor que faz  $\Delta V = 0$  é aproximadamente  $x_{\text{con2}} = 10$  [ $\Omega$ ] (vide Fig. 3.13) e, comparado com o calculado, que é  $X_{\text{con2}} = 8.9$  [ $\Omega$ ], dá um erro de 11%.
- \_ Da Fig. 3.13 também observa-se que a queda de tensão  $\Delta V = 0$  coincide com  $X_{\text{con2}} = 10$  [ $\Omega$ ].

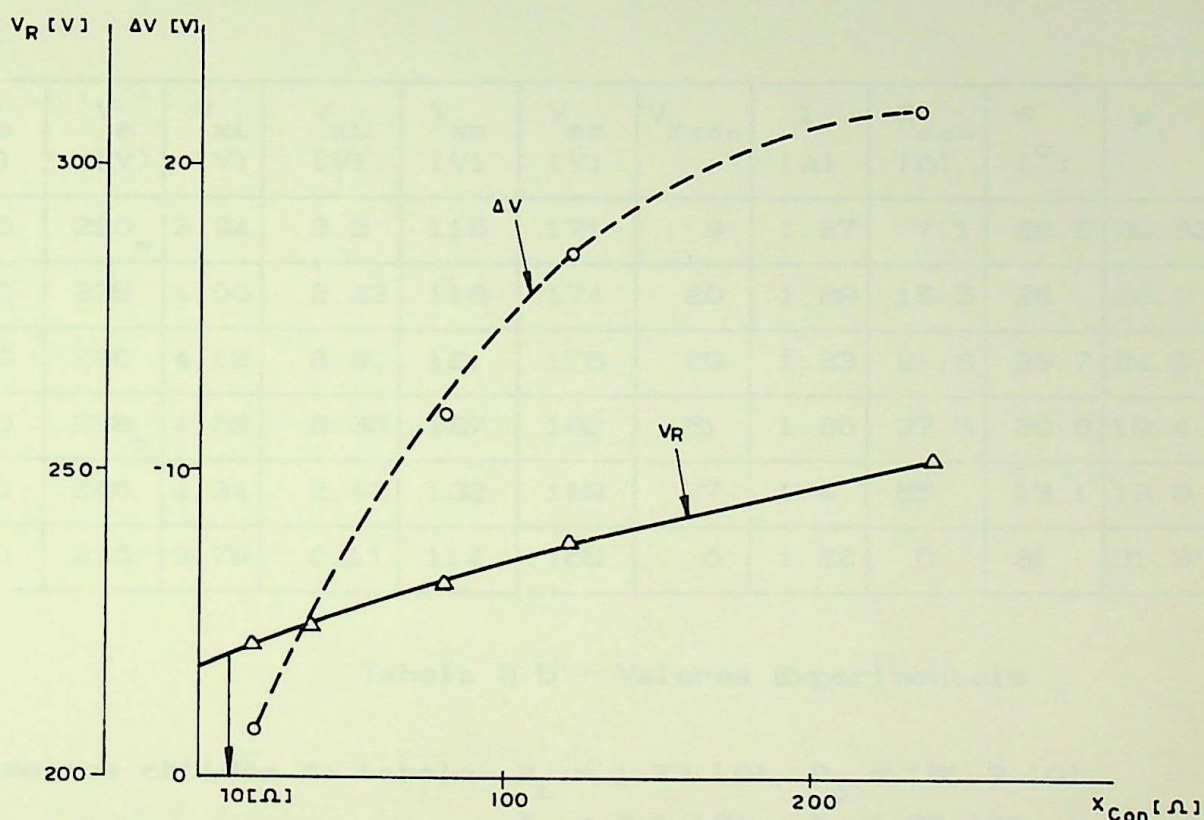


Fig. 3.13 - Curvas Experimentais da Tensão na Carga e a Queda de Tensão em Função de  $X_{\text{con}}$

- \_ A experiência realizada para este caso foi feita apenas em uma faixa da reatância do capacitor (0 a 250 [ $\Omega$ ]). Por isso, a curva de tensão  $V_R$  não é completa (vide Fig. 3.13).

- \_ Observa-se, também, o deslocamento do perfil de tensões no ponto de carga igual aos verificados nos casos contemplados no item anterior (vide Fig.3.12).

### Caso II

- \_ Alocação do capacitor no extremo final do alimentador.

- \_ Bitola 107.22 mm<sup>2</sup>, L = 10 [km].

$P_s$ [W]	$V_s$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{Xcon}$	I [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]	$\theta$ [ $^\circ$ ]	$\phi_t$
250	220	220 <sub>a</sub>	3.94	2.2	115	171	9	1.27	7.1	26.5	29.33
255	220	225	4.00	2.23	118	174	20	1.29	15.5	26	26.9
268	220	230	4.12	2.30	121	176	29	1.33	21.8	23.7	24.9
280	220	238 <sub>b</sub>	4.22	2.35	127	182	51	1.36	37.5	20.6	19.4
300	220	246	4.34	2.42	132	189	77	1.4	55	13.1	13.9
230	220	216	3.78	2.11	114	165	0	1.22	0	31	31.3

Tabela 3.5 - Valores Experimentais

Parâmetros obtidos da tabela:  $R_L = 1.73$  [ $\Omega$ ],  $R_C = 151.3$  [ $\Omega$ ]  
 $X_L = 3.1$  [ $\Omega$ ],  $X_C = 90$  [ $\Omega$ ]

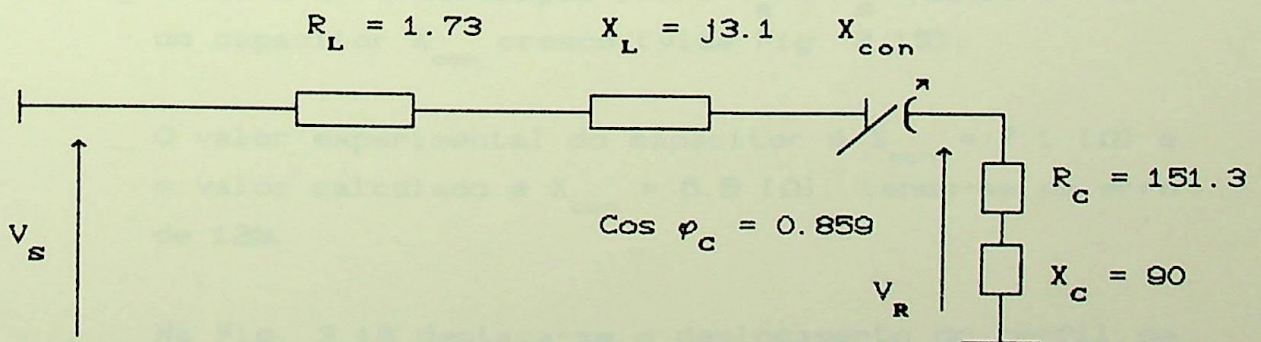


Fig. 3.14 - Circuito Representativo do Alimentador

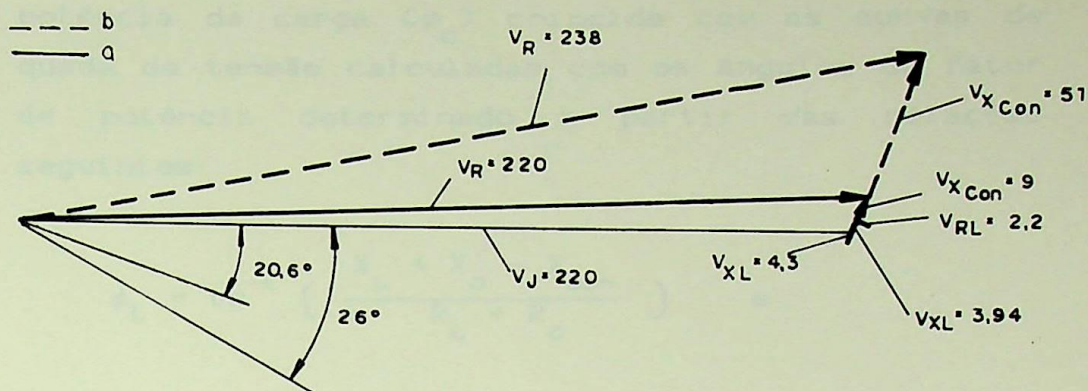


Fig. 3.15 - Diagrama Fasorial

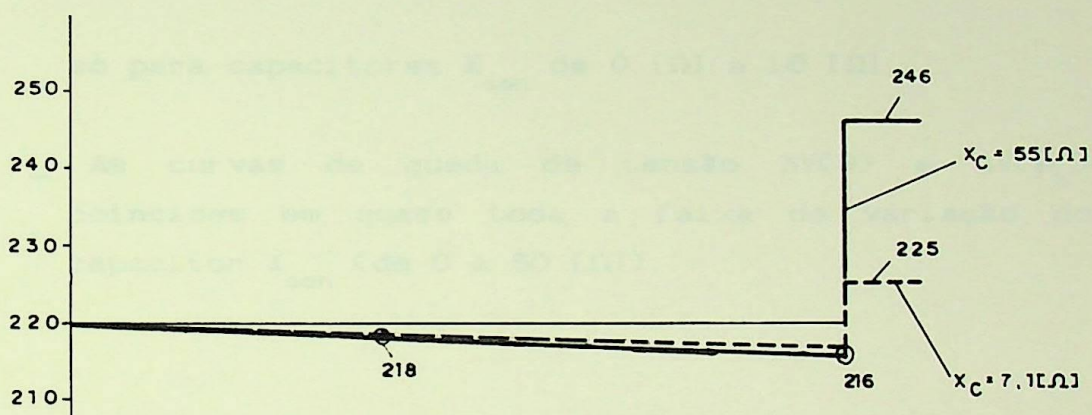


Fig. 3.16 - Perfil de Tensões

Comentários:

- \_ Observa-se a defasagem entre  $V_R$  e  $V_S$  quando o valor do capacitor  $X_{con}$  cresce (vide Fig. 3.15).
- \_ O valor experimental do capacitor é  $X_{con} = 7.1 [\Omega]$  e o valor calculado é  $X_{con} = 6.5 [\Omega]$ , tendo-se um erro de 12%.
- \_ Na Fig. 3.16 destaca-se o deslocamento do perfil de tensões segundo o valor do capacitor  $X_{con}$ .

- \_ Da Fig. 3.17 observa-se que a curva de queda de tensão calculada em função do ângulo do fator de potência da carga ( $\phi_c$ ) coincide com as curvas de queda de tensão calculadas com os ângulos de fator de potência determinado a partir das relações seguintes:

$$\phi_t = \text{tg}^{-1} \left( \frac{X_L + X_C - X_{\text{con}}}{R_L + R_C} \right) \quad e$$

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{P}{V I} \right)$$

só para capacitores  $X_{\text{con}}$  de 0 [ $\Omega$ ] a 15 [ $\Omega$ ].

- \_ As curvas de queda de tensão  $\Delta V(\theta)$  e  $\Delta V(\phi_t)$  coincidem em quase toda a faixa de variação do capacitor  $X_{\text{con}}$  (de 0 a 60 [ $\Omega$ ]).

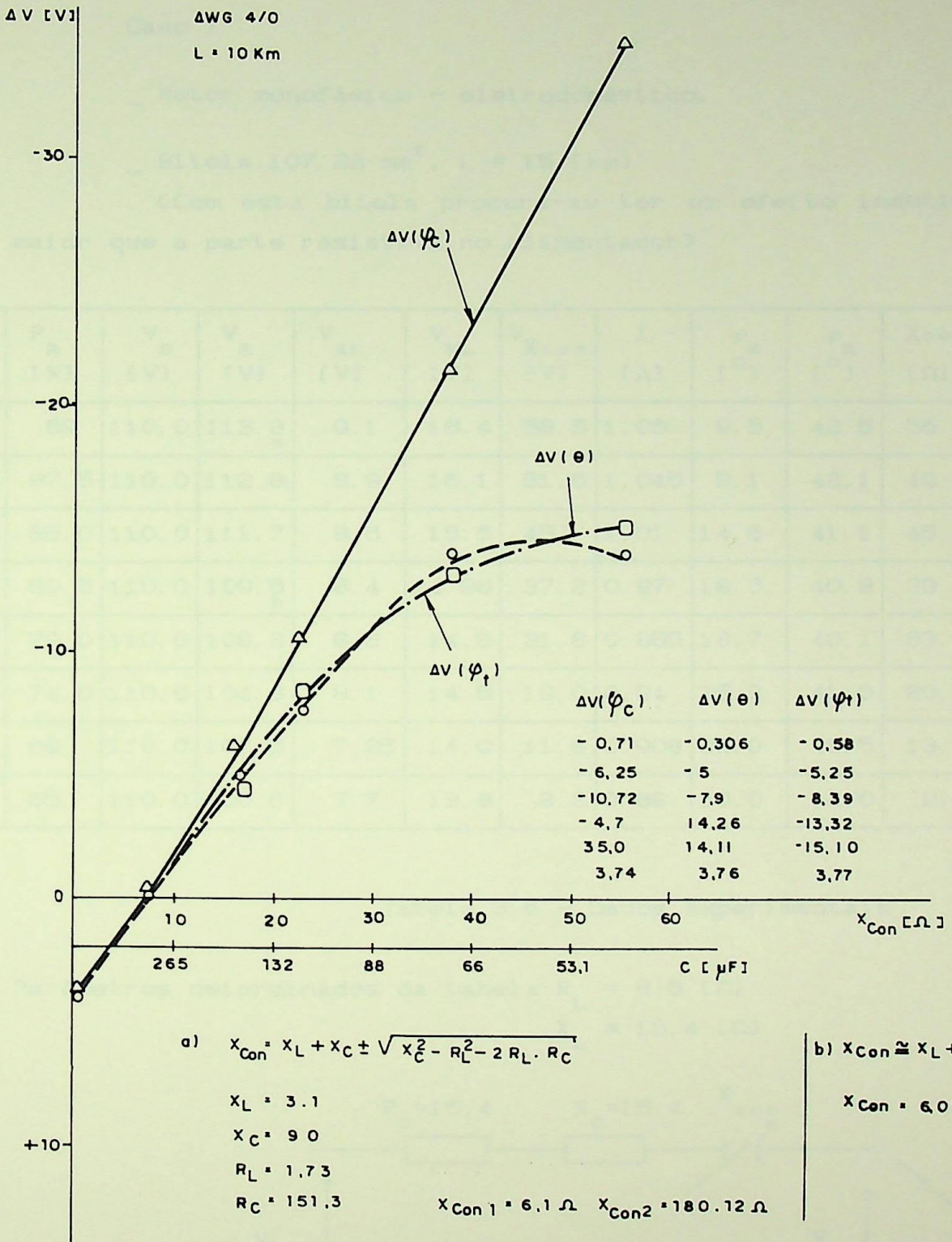


Fig. 3.17 - Curvas Experimentais de Queda de Tensão.

## 3.4.3 - CARGAS ATIVAS

Caso I

\_ Motor monofásico - eletrodoméstico.

\_ Bitola 107.22 mm<sup>2</sup>, L = 15 [km]

(Com esta bitola procura-se ter um efeito indutivo maior que a parte resistiva no alimentador)

$P_S$ [W]	$P_R$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{Xcon}$ [V]	I [A]	$\phi_S$ [°]	$\phi_R$ [°]	$X_{con}$ [Ω]	$\Delta V$ [V]
115	89	110.0	113.8 <sub>a</sub>	9.1	16.4	58.5	1.06	9.5	42.5	55.2	-16.0
113.5	87.5	110.0	112.8	8.9	16.1	51.6	1.045	9.1	42.1	49.4	-10.8
107.5	85.0	110.0	111.7	8.6	15.6	45	1.01	14.6	41.1	45.0	-8.08
101.5	80.5	110.0	109.6 <sub>b</sub>	8.4	14.98	37.2	0.97	18.0	40.8	38.4	-6.7
99.5	79.0	110.0	108.2	8.2	14.8	31.8	0.955	18.7	40.1	33.1	0.507
93.5	74.0	110.0	104.3	8.1	14.5	19.0	0.94	25.3	41.0	20.2	7.916
85.0	69	110.0	101.5	7.85	14.0	11.8	0.908	32.0	41.5	13.0	10.01
76	65	110.0	100.6	7.7	13.8	8.2	0.89	39.0	42.0	9.2	9.9

Tabela 3.6 - Dados Experimentais

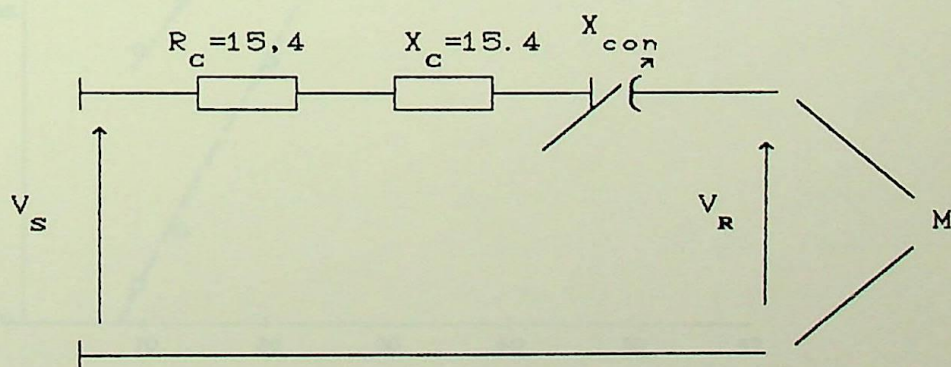
Parâmetros determinados da tabela  $R_L = 8.6$  [Ω] $X_L = 15.4$  [Ω]

Fig. 3.18 - Circuito do Alimentador

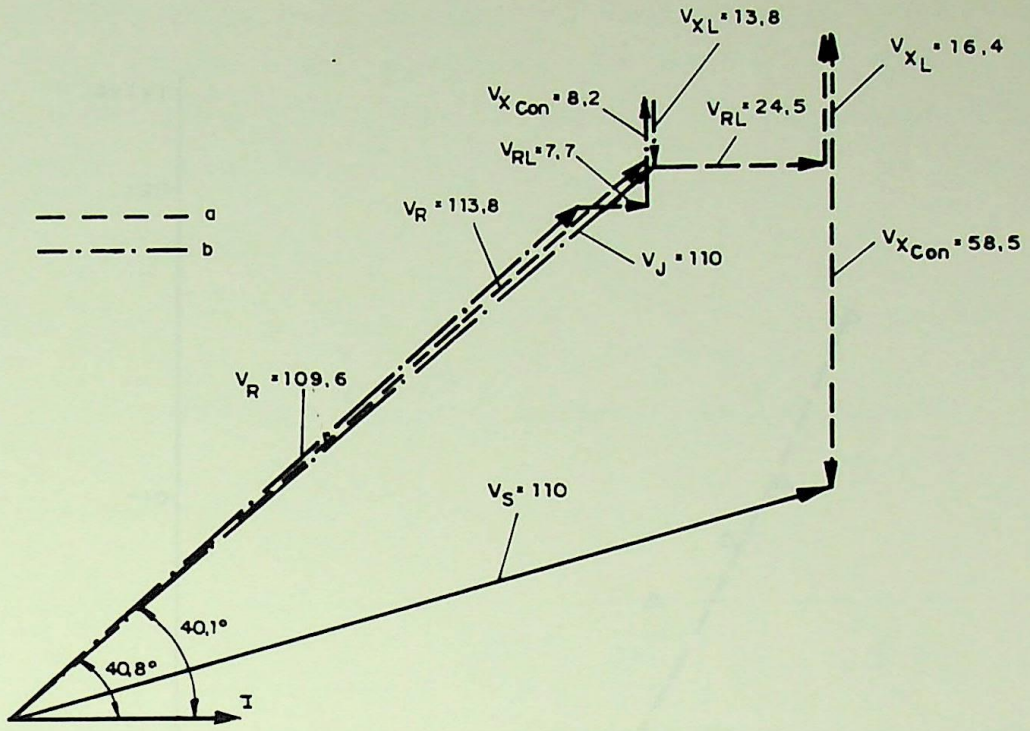


Fig. 3.19 - Diagrama Fasorial

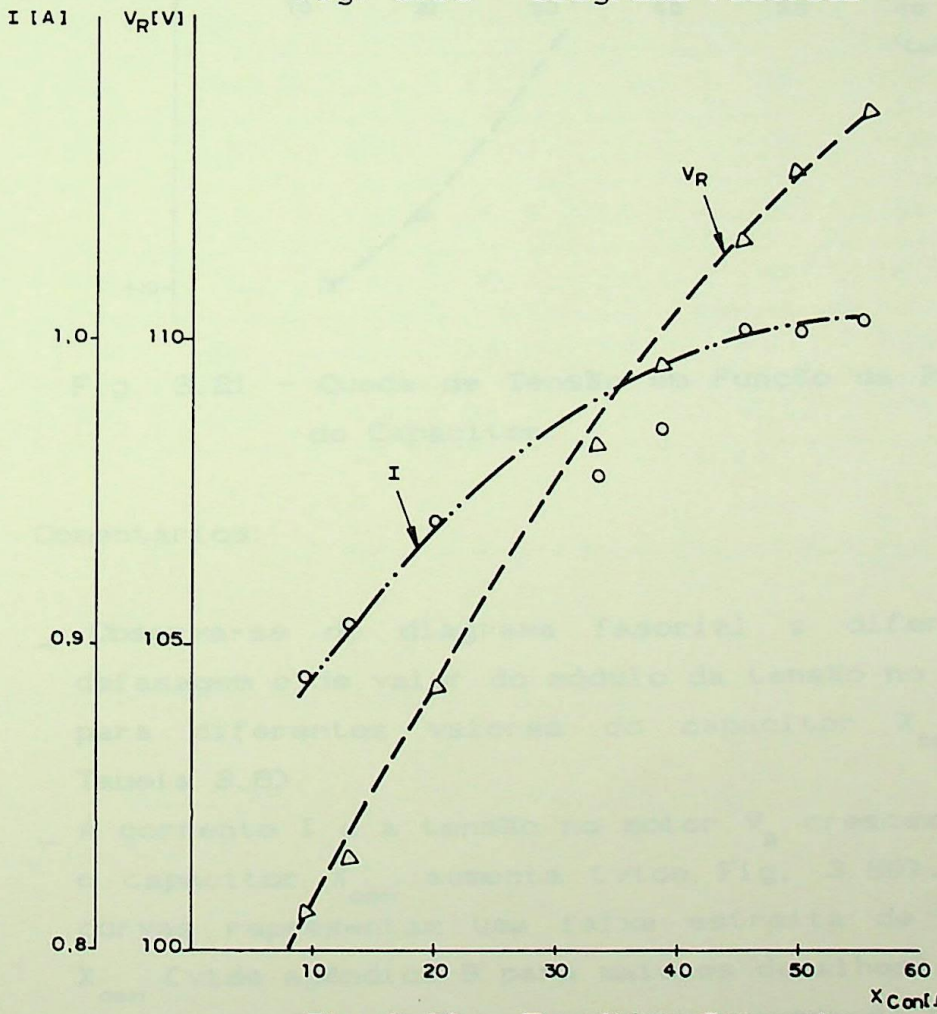


Fig 3.20 - Tensão e Corrente na Carga

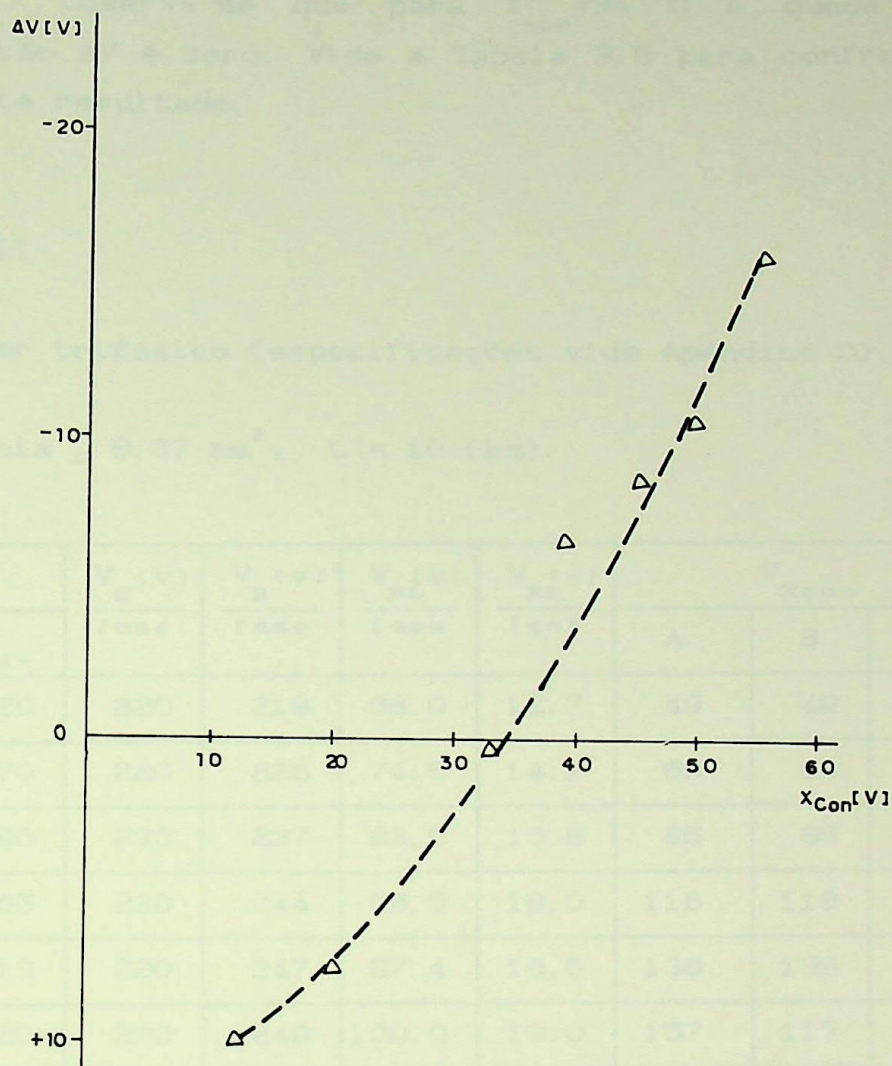


Fig. 3.21 - Queda de Tensão em Função da Reatância do Capacitor

Comentários:

- \_ Observa-se do diagrama fasorial a diferença de defasagem e de valor do módulo da tensão no motor  $V_R$  para diferentes valores do capacitor  $X_{con}$  (vide Tabela 3.6).
- \_ A corrente  $I$  e a tensão no motor  $V_R$  crescem segundo o capacitor  $X_{con}$  aumenta (vide Fig. 3.20), mas as curvas representam uma faixa estreita de variação  $X_{con}$  (vide apêndice B para maiores detalhes).
- \_ A curva da Fig. 3.21 representa a queda de tensão no

alimentador com a mudança da reatância do capacitor  $X_{con}$ . Observa-se que para  $X_{con} = 34 \Omega$  a queda de tensão  $\Delta V$  é zero. Vide a Tabela 3.6 para confronto deste resultado.

### Caso II

\_ Motor trifásico (especificações vide Apêndice D).

\_ Bitola \_  $8.37 \text{ mm}^2$ ,  $L = 10 \text{ [km]}$ .

$P_S$		$P_R$		$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{Xcon}$			$I$ [A]
$W_{2+}$	$W_{1+}$	$W_{2-}$	$W_{1+}$	fase	fase	fase	fase	A	B	C	fase
70	855	255	420	220	219	68.0	12.7	49	49	49	3.10
40	745 <sub>a</sub>	287	470	220	226	74.5	14.1	63	63	63	3.43
85	850	345	580	220	237	83.6	15.8	85	85	85	3.87
15	960	390	665	220	244	95.0	18.0	116	118	118	4.38
15	955	415	713	220	247	97.4	18.5	136	138	137	4.52
30	945	420	720	220	249	100.0	19.0	157	117	158	4.63
05	250	290	480	220	226	73.0	13.8	228	229	229	3.40
03	65	200	323	220	201	54.0	10.3	230	231	230	2.50

Tabela 3.7 - Dados Experimentais

Parâmetros calculados da tabela

$$R_{LA} = 21.6 [\Omega], R_{LB} = 21.6 [\Omega], R_{LC} = 21.6 [\Omega]$$

$$X_{LA} = 4.1 [\Omega], X_{LB} = 4.1 [\Omega], X_{LC} = 4.1 [\Omega]$$

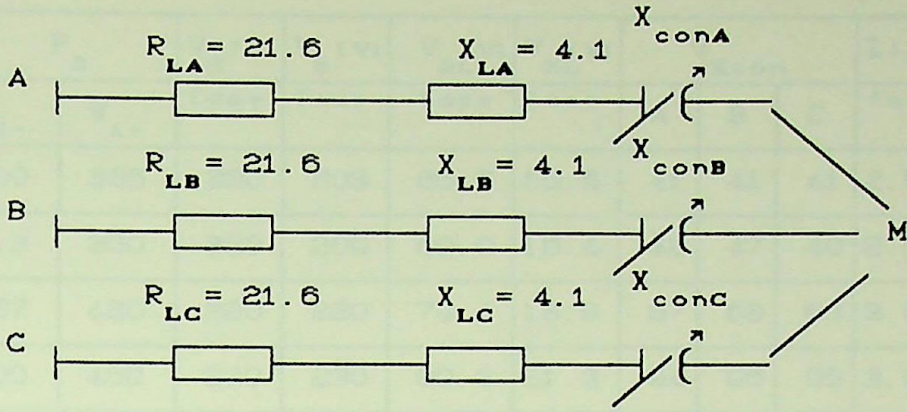


Fig. 3.22 - Circuito do Alimentador

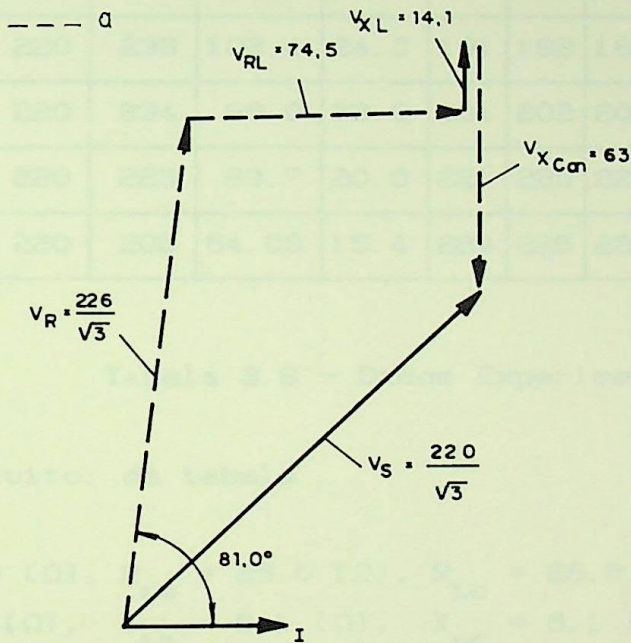


Fig. 3.23 - Diagrama Fasorial (Caso II)

Caso III

\_ Motor trifásico (especificações vide Apêndice D).

\_ Bitola -  $10.55 \text{ mm}^2$ ,  $L = 15 \text{ [km]}$ .

$P_S$		$P_R$		$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{Xcon}$			$I$ [A]	$V$ [V] con
$W_{2+}$	$W_{1+}$	$W_{2-}$	$W_{1+}$	fase	fase	fase	fase	A	B	C	fase	fase
125	535	200	325	220	203	65.6	15.6	41	41	41	2.56	16.0
150	565	213	350	220	209	69.0	16.4	48	47	48	2.69	17.8
245	663	257	420	220	220	79.4	18.9	67	68	68	3.08	22.1
393	758	300	450	220	230	89.6	21.3	94	95	95	3.50	27.1
485	823	325	540	220	234	97.4	23.2	111	112	113	3.80	29.5
600	835	350	590	220	238	99.8	23.8	135	134	135	3.90	34.6
712	803	360	605	220	240	103.3	24.5	156	157	158	4.03	38.9
780	690	355	593	220	238	102.4	24.3	181	182	182	4.00	45.5
775	537	335	555	220	234	96.0	23.0	201	202	202	3.75	53.9
690	320	280	455	220	223	83.7	20.0	221	220	221	3.27	67.6
505	105	200	313	220	206	64.03	15.4	224	225	225	2.50	90.0

Tabela 3.8 - Dados Experimentais

Parâmetros do circuito: da tabela

$$R_{LA} = 25.6 \text{ } [\Omega], R_{LB} = 25.6 \text{ } [\Omega], R_{LC} = 25.6 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{LA} = 6.1 \text{ } [\Omega], X_{LB} = 6.1 \text{ } [\Omega], X_{LC} = 6.1 \text{ } [\Omega]$$

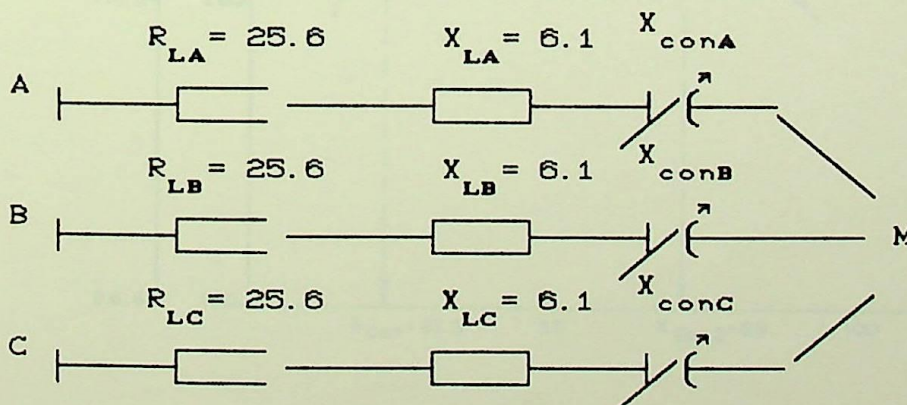


Fig. 3.24 - Circuito do Alimentador

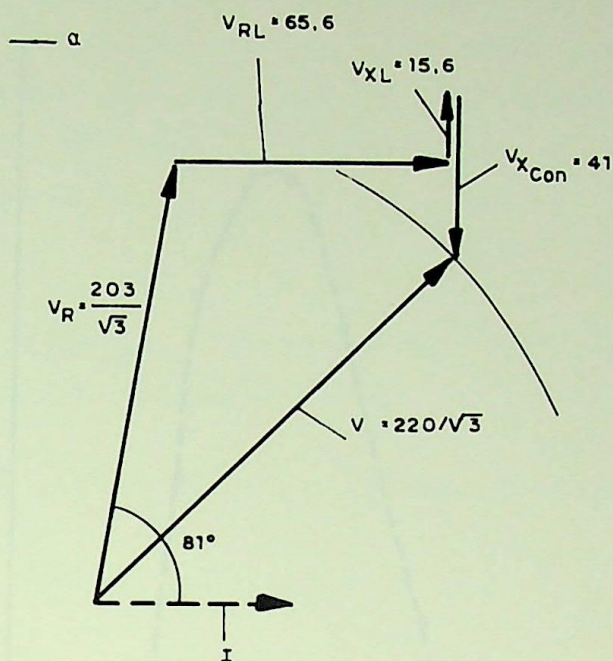
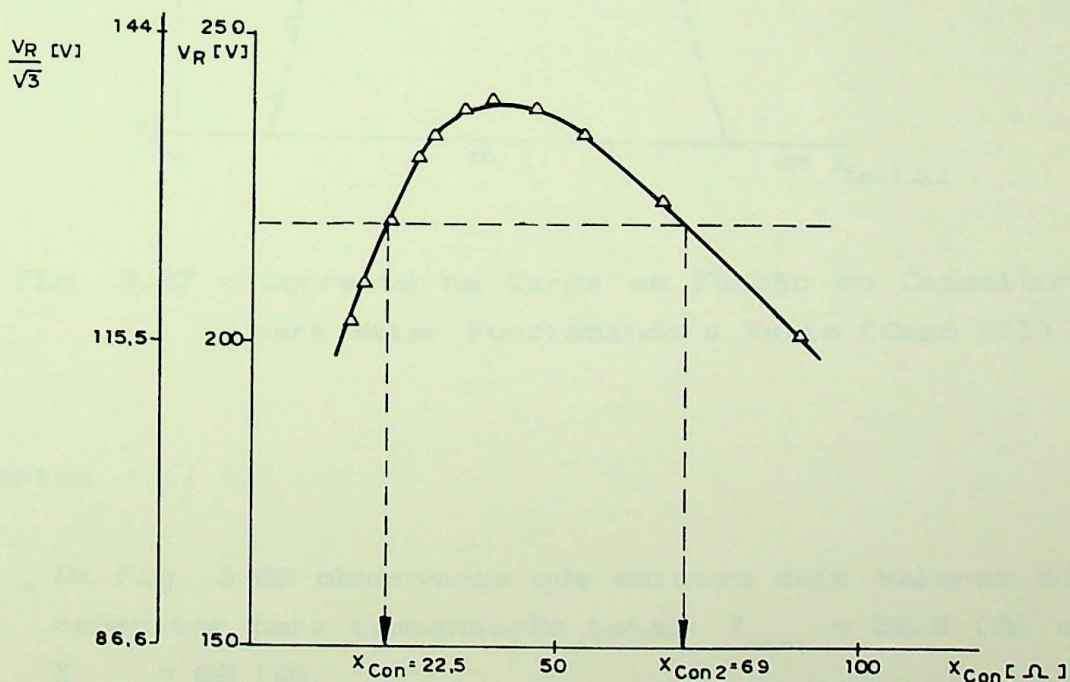


Fig. 3.25 - Diagrama Fasorial (Caso III)

Fig. 3.26 - Tensão na Carga em função do Capacitor  $X_{con}$  (Caso III)

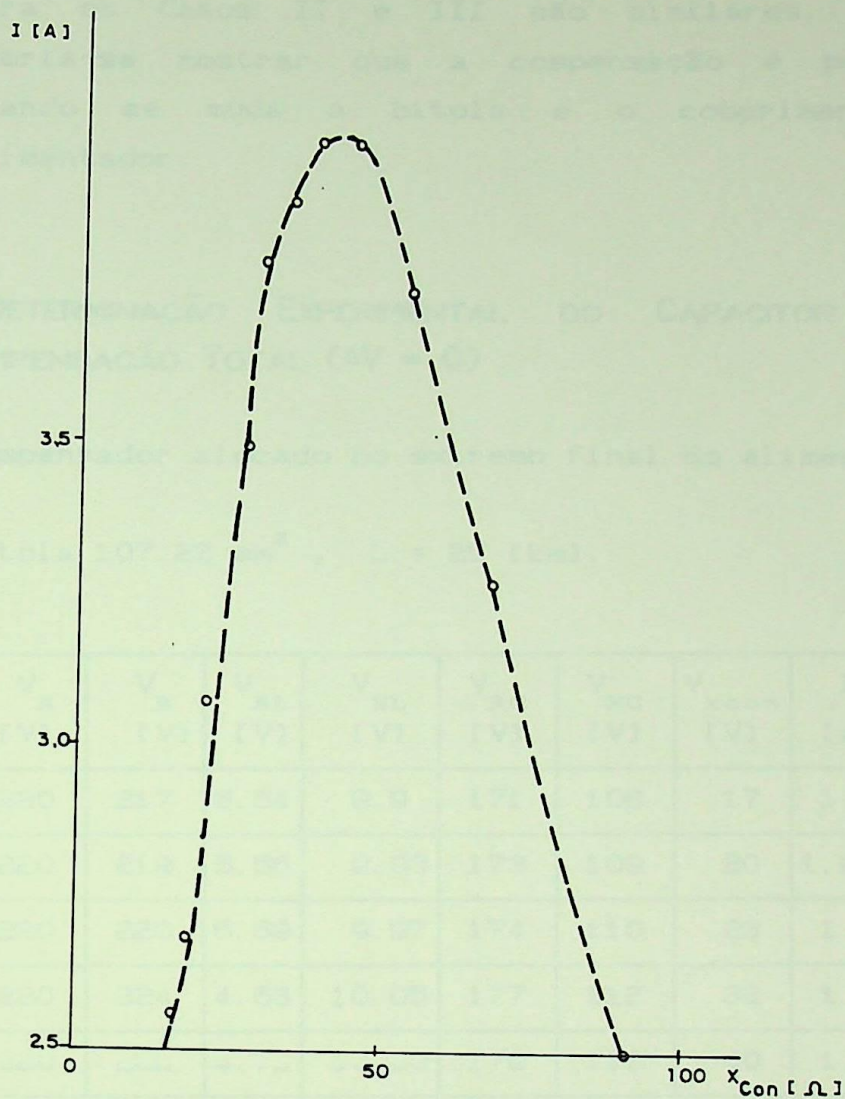


Fig. 3.27 - Corrente na Carga em Função do Capacitor para Motor Funcionando a Vazio (Caso III)

Comentários:

- \_ Da Fig. 3.26 observa-se que existem dois valores do capacitor para compensação total:  $X_{con1} = 22.5 [\Omega]$  e  $X_{con2} = 69 [\Omega]$ .
- \_ A curva característica de corrente na carga é mostrada na Fig. 3.27 e apresenta um máximo de  $I = 5$  [A] quando o  $X_{con} = 40 [\Omega]$ .

- \_ As características das resposta em corrente e tensão para os Casos II e III são similares. Apenas queria-se mostrar que a compensação é possível quando se muda a bitola e o comprimento do alimentador.

### 3.4.4 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO CAPACITOR PARA COMPENSAÇÃO TOTAL ( $\Delta V = 0$ )

- \_ Compensador alocado no extremo final do alimentador.

- \_ Bitola 107.22 mm<sup>2</sup> , L = 25 [km].

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{xcon}$ [V]	I [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]
252	220	217	5.54	9.9	171	108	17	1.28	13.3
257	220	219	5.56	9.93	173	109	20	1.285	15.6
259	220	220	5.59	9.97	174	110	23	1.29	17.8
267	220	224	4.63	10.05	177	112	32	1.30	24.6
275	220	225	4.72	10.20	179	113	40	1.32	30.3
285	220	231	5.86	10.43	183	116	53	1.35	39.3
300	220	237	6.02	10.74	187	119	75	1.39	54.0
318	220	243	6.19	11.10	193	123	128	1.43	89.5
300	220	234	6.02	10.74	186	119	185	1.39	133.1
250	220	214	5.46	9.74	169	107	222	1.26	176.2
235	220	209	5.28	9.43	165	105	252	1.22	—

Tabela 3.9 - Dados Experimentais

Parâmetros do circuito:

$$R_L = 4.33 [\Omega], R_c = 152.2 [\Omega]$$

$$X_L = 7.73 [\Omega], X_c = 83.7 [\Omega]$$

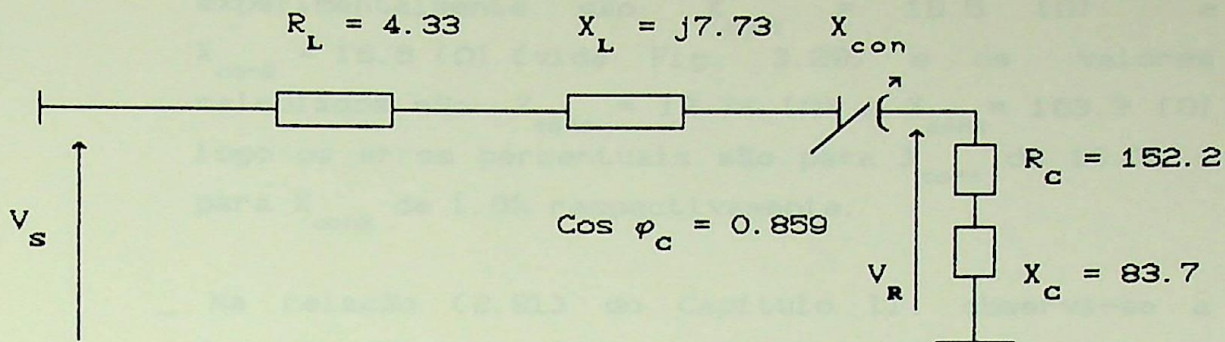


Fig. 3.28 - Circuito do Alimentador

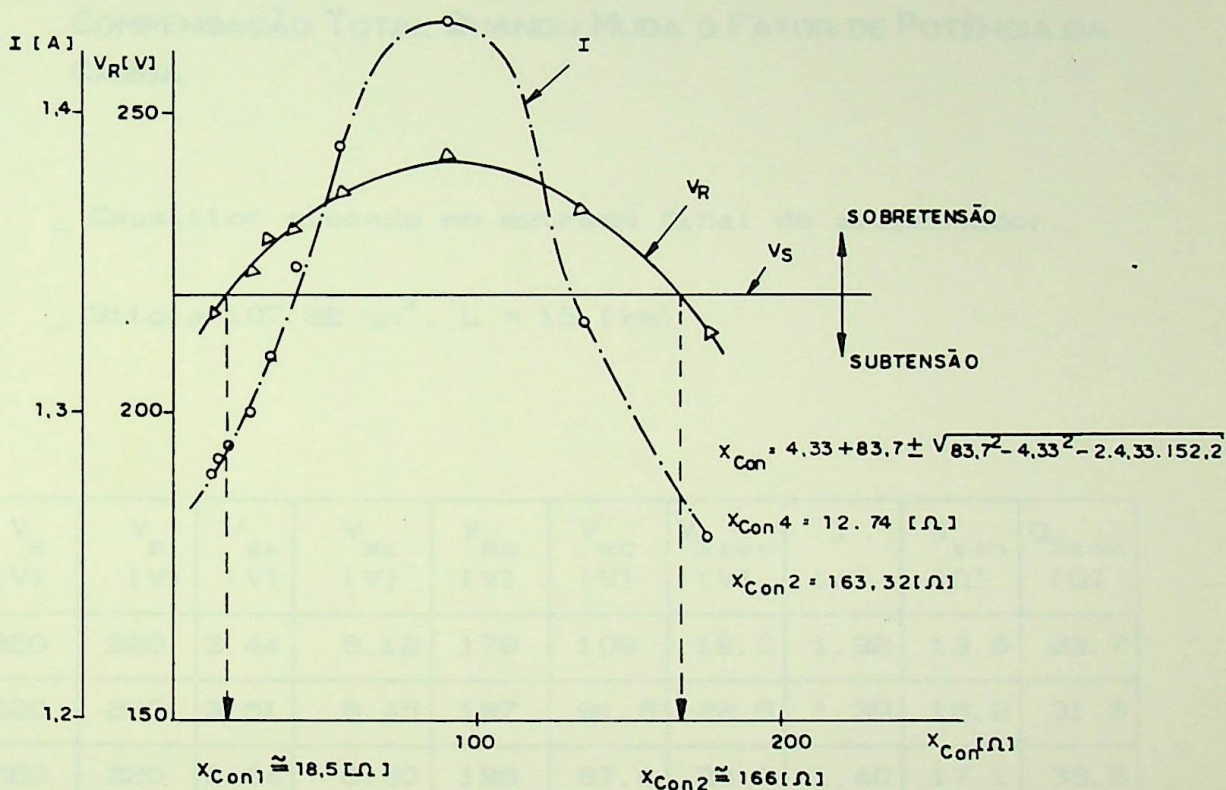


Fig. 3.29 - Curvas para a Determinação Experimental dos Capacitores para Compensação Total e Variação da Corrente.

Comentário:

\_ Os valores dos capacitores determinados

experimentalmente são:  $X_{\text{con1}} = 18.5 \text{ } [\Omega]$  e  $X_{\text{con2}} = 16.6 \text{ } [\Omega]$  (vide Fig. 3.29) e os valores calculados são:  $X_{\text{con1}} = 12.74 \text{ } [\Omega]$  e  $X_{\text{con2}} = 163.3 \text{ } [\Omega]$  logo os erros percentuais são para  $X_{\text{con1}}$  de 10.3% e para  $X_{\text{con2}}$  de 1.6% respectivamente.

- Na relação (2.81) do Capítulo II, observa-se a dependência parabólica de  $V_R$  em função de  $X_{\text{con}}$ , o que se verifica experimentalmente (vide Fig. 3.29).

### 3.4.5 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO CAPACITOR PARA COMPENSAÇÃO TOTAL QUANDO MUDA O FATOR DE POTÊNCIA DA CARGA

- Capacitor alocado no extremo final do alimentador.
- Bitola  $107.22 \text{ mm}^2$ ,  $L = 15 \text{ } [\text{km}]$ .

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{Xcon}$ [V]	I [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]	$Q_{Xcon}$ [ $\Omega$ ]
264	220	220	3.44	6.12	178	109	18.0	1.32	13.6	23.7
290	220	220	3.61	6.45	187	91.5	22.5	1.39	16.2	31.3
295	220	220	3.64	6.50	186	87.6	23.9	1.40	17.1	33.5
315	220	220	3.77	6.73	196	73	28.5	1.45	19.6	41.2
330	220	220	3.87	6.91	200	62	37.0	1.49	25.0	55.5
338	220	220	3.92	7.00	203	60	52.0	1.51	34.4	78.4
340	220	220	3.95	7.05	202	61	83.0	1.52	54.6	126.1

Tabela 3.10 - Dados Experimentais

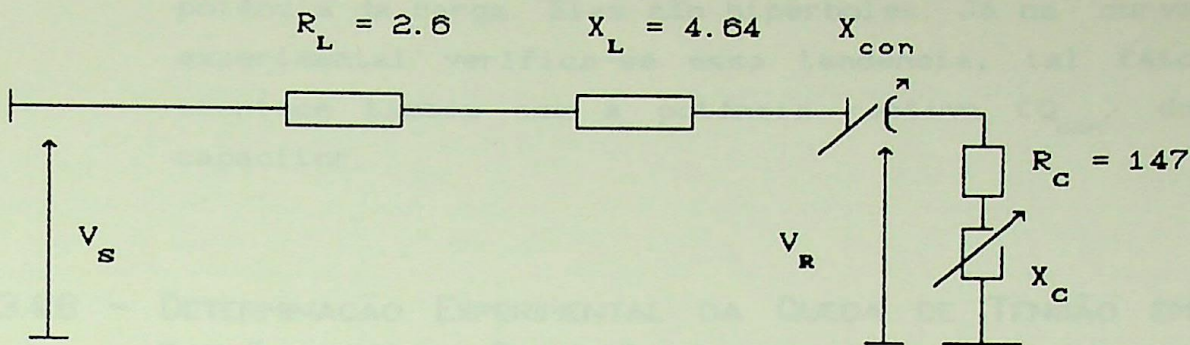


Fig. 3.30 - Circuito do Alimentador

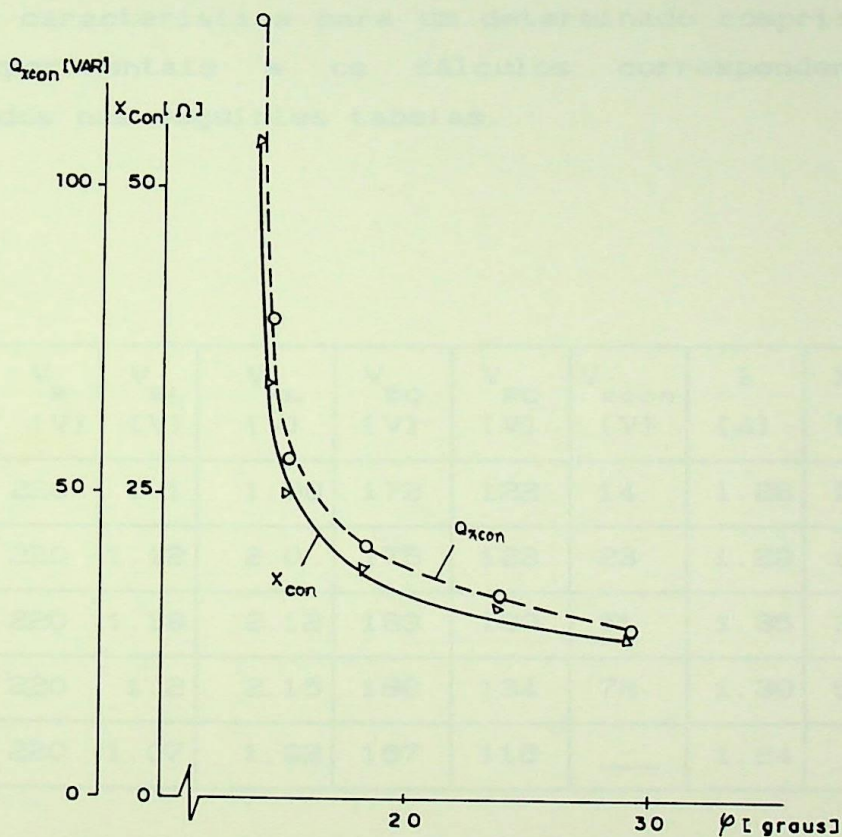


Fig. 3.31 - Potência e Reatância do Capacitor Quando Muda o Ângulo de Fator de Potência.

Comentários:

\_ Na Fig. 2.29 do Capítulo II, obteve-se teoricamente as curvas de  $X_{con}$  em função do ângulo de fator de

potência da carga. Elas são hipérbolas. Já na curva experimental verifica-se essa tendência, tal fato acontece também com a potência reativa ( $Q_{con}$ ) do capacitor.

### 3.4.6 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA QUEDA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO CAPACITOR.

Visando obter as curvas de variação da queda de tensão quando muda o capacitor  $X_{con}$ , foi escolhido uma bitola determinada e nela foi mudada a resistência e a reatância característica para um determinado comprimento. Os dados experimentais e os cálculos correspondentes são apresentados nas seguintes tabelas.

$P_s$ [W]	$V_s$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{xcon}$ [V]	I [A]	$X_{con}$ [Ω]	$\Delta V$ [V]
250	225	220	1.1	1.98	172	122	14	1.28	10.9	-5.34
258	230	220	1.12	2.0	175	123	23	1.29	17.8	-10.1
280	240	220	1.18	2.12	183	130	51	1.36	38	-25.0
295	247	220	1.2	2.15	188	134	72	1.39	52	-36
235	218	220	1.07	1.92	167	116	—	1.24	—	+1.92

Tabela 3.11 - Valores Experimentais para  $L = 5$  [km]

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{xcon}$ [V]	I [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]	$\Delta V$ [V]
250	220	220	2.2	3.94	171	115	9	1.27	7.1	-0.71
255	225	220	2.23	4.00	174	118	20	1.29	15.5	-6.25
268	230	220	2.3	4.12	176	121	29	1.33	21.8	-10.72
280	238	220	2.35	4.22	182	127	51	1.36	37.5	-21.7
300	246	220	2.42	4.34	189	132	77	1.4	55.0	-35
330	216	220	2.11	3.78	165	114	—	1.22	0	+ 3.74

Tabela 3.12 - Valores Experimentais para  $L = 10$  [km]

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{xcon}$ [V]	I [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]	$\Delta V$ [V]
230	220	219	3.14	5.60	164	114	—	1.21	—	+5.58
240	220	220	3.22	5.74	168	117	10	1.24	8.1	0.54
252	220	225	3.27	5.83	172	120	21	1.26	16.7	-5.03
265	220	231	3.38	6.01	176	124	39	1.30	30.0	-14.1
287	220	240	3.53	6.29	183	129	62	1.36	45.6	-25.67

Tabela 3.13 - Valores Experimentais para  $L = 15$  [km]

$P_S$ [W]	$V_S$ [V]	$V_R$ [V]	$V_{RL}$ [V]	$V_{XL}$ [V]	$V_{RC}$ [V]	$V_{XC}$ [V]	$V_{X_{con}}$ [V]	I [A]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ]	$\Delta V$ [V]
230	220	214	5.19	9.28	163	115	9.4	1.2	7.83	4.14
240	220	218	5.32	9.50	165	117	16.9	1.23	13.70	0.53
257	220	225	5.50	9.8	172	121	35	1.27	27.60	-8.55
272	220	231	5.70	10.1	176	125	51	1.31	38.4	-16.4
190	220	208	5.10	9.0	158	112	0.0	1.17	0	+8.76

Tabela 3.14 - Valores Experimentais para  $L = 25$  [km]

A Fig. 3.32 mostra a variação da queda de tensão  $\Delta V(V)$  quando muda a reatância do condensador  $X_{con}$  para uma bitola  $107.22 \text{ mm}^2$ , com diferentes comprimentos. Observa-se o comportamento linear de  $\Delta V$ . Pode-se determinar das curvas o valor do capacitor  $X_{con}$  para queda de tensão total  $\Delta V = 0$ .

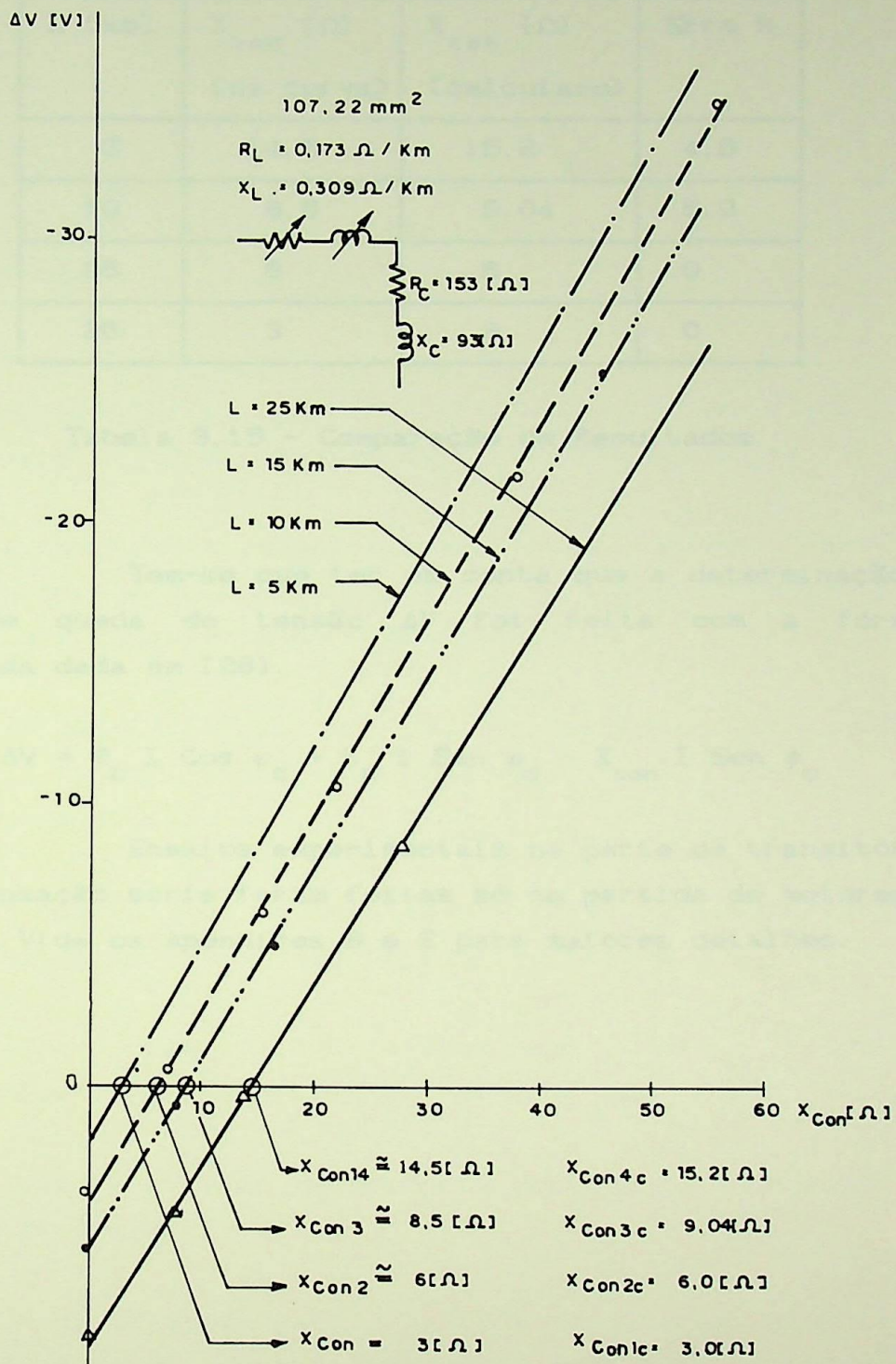


Fig. 3.32 - Variação da Queda de Tensão para Diferentes Comprimentos do Alimentador em Função da Reatância do Capacitor.

Assim pode-se obter os seguintes resultados:

L [km]	$X_{con}$ [ $\Omega$ ] (da curva)	$X_{con}$ [ $\Omega$ ] (calculado)	Erro %
5	14.5	15.2	4.6
10	8.5	9.04	5.9
15	6	6	0
25	3	3	0

Tabela 3.15 - Comparação de Resultados

Tem-se que ter em conta que a determinação da curva de queda de tensão  $\Delta V$  foi feita com a fórmula aproximada dada em [28].

$$\Delta V = R_L I \cos \phi_c + X_L I \sin \phi_c - X_{con} I \sin \phi_c$$

Ensaio experimentais na parte de transitórios na compensação série foram feitas só na partida de motores de indução. Vide os Apêndices B e E para maiores detalhes.

## CAPÍTULO IV

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- \_ Conseguiu-se desenvolver a teoria básica da compensação série quando aplicado aos sistemas elétricos de distribuição.
- \_ Foi feita a verificação experimental da compensação série quando requerida sob diferentes configurações do alimentador e sob diferentes solicitações de cargas.
- \_ Das duas conclusões gerais acima citadas, pode-se afirmar com certeza que a aplicação prática da compensação série é viável tecnicamente pelos seguintes fatos:
  - \_ Melhora o perfil de queda de tensões do alimentador e torna possível conectar novas cargas no alimentador.
  - \_ A resposta do compensador série é instantânea e reduz as flutuações rápidas de tensão.
  - \_ As perdas no alimentador são reduzidas significativamente.
  - \_ Melhora o fator de potência de todo o conjunto do alimentador.
  - \_ Serve de apoio para a partida de motores elétricos, seja por aumento da tensão na partida ou diminuição da corrente de partida.
- \_ Durante a realização das experiências com cargas ativas foi observada a ocorrência de anormalidades na operação de

motores elétricos de indução. Para aprofundar e corrigir os referidos problemas, aconselha-se realizar os seguintes estudos:

- \_ Auto-excitação de motores de indução.
- \_ Pulsação mecânica do torque de motores de indução.
- \_ Transitórios eletromagnéticos da compensação série, em caso de curto-circuitos, partida de motores, etc.
- \_ Outro estudo é a ferrorressonância de transformadores.
- \_ Estudo do desenvolvimento futuro das tecnologias da compensação série quando aplicadas aos sistemas de distribuição.
- \_ Estudos econômicos confrontando a compensação série com outras alternativas técnicas de melhoramento de queda e flutuação de tensão nas redes elétricas.
- \_ Estudo da Compensação Série ligadas a cargas elétricas especiais, como fornos elétricos, motores de indução de grande porte.
- \_ Estudo da Compensação Série em sistemas de distribuição fortemente desequilibrados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1] GRAINGER, J.J. and LEE, S.H. - Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 1105 - 1118, Mar. 1981.
- [ 2] LEE, S.H. and GRAINGER, J.J. - Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 345 - 351, Jan. 1981.
- [ 3] NEAGLE, N.M. and SAMSON, D.R. - Loss Reduction from Capacitors Installed on Primary Feeders. AIEE Transactions, vol. 75, Part III, pp. 950 - 959, 1956
- [ 4] COOK, R.F. - Analysis of Capacitor Application as Affected by Load Cycle. AIEE Transactions, vol. 78, Part IIIA, pp. 950-957, 1959.
- [ 5] MAXWELL, M. - The Economic Application of Capacitors to Distribution Feeders. AIEE Transactions, vol. 79, pp. 353 - 359, 1960.
- [ 6] COOK, R.F. - Calculating Loss Reduction Afforded by Shunt Capacitors Application. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 83, pp. 1227 - 1230, 1964.
- [ 7] CHANG, N.E. - Determination of Primary - Feeder Losses. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 87, pp. 1991 - 1984, Dec. 1968.

- [ 8] CHANG, N.E. - Locating Shunt Capacitors on Primary Feeder for Voltage Control and Loss Reduction. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 88, pp. 1574 - 1577, Oct. 1969.
- [ 9] CHANG, N.E. - Generalized Equations on Loss Reduction with Shunt Capacitor". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 91, pp. 2189 - 2195, 1972.
- [10] RANKINE, L.J. - Method of Locating Shunt Capacitors Suitable for Computer Solution. Electrical World, pp. 72 - 73, Sept. 26, 1960.
- [11] GRAINGER, J.J. - Capacitive Compensation of Primary Feeders for Loss Reduction. T&D, vol. 34, n<sup>o</sup> 7, pp. 38 - 39, July 1982.
- [12] STARR, E.C. and EVANS, R.D. - Series Capacitors for Transmission Circuits. AIEE Transactions, vol 61, pp. 963 - 973, 1942.
- [13] MILLER, G.B. - Design and Layout of 66-KV, 10,000 kVA Series Capacitor Substation. AIEE Transactions, vol. 67, pp. 363 - 367, 1948.
- [14] JOHNSON, A.A. - Series Capacitors Approach Maturity. Westinghouse Engineer, vol. 8, pp. 106 - 111, July 1968.
- [15] BUTLER, J.W. and CONCORDIA, C. - Analysis of Series Capacitors Application Problems. AIEE Transactions, pp. 975 - 988, 1937.
- [16] SHELTON, E.K. - Series Capacitors Installation at Ballston, N.Y.. General Electric Review, vol. 33, pp. 461, Nov. 1930.

- [17] ALIMANSKI, M.I. - Applications and Performance of Series Capacitors. General Electric Review, vol. 33, pp. 461, Nov. 1930.
- [18] DUDLEY, C.L. and SNYDER, E.H. - Why not Series Capacitors for Distribution Feeders ?. Electric World, vol. 103, pp.945-5, June 30,1934.
- [19] DENTON, W.J. and REPS, D.N. - Distribution Substation and Primary Feeder - Planning. AIEE Transactions, pp. 484 - 499, June 1955.
- [20] WAGNER, C.F. - Self-Excitation of Induction Motors with Series Capacitors. AIEE Transactions, vol. 60, pp. 1241 - 1247.
- [21] REPS, D.N. and KIRK, G.K. - Distribution on System Primary - Feeder Voltage Control - II. AIEE Transactions, vol. 62, pp. 856 - 864, Oct. 1958.
- [22] BURIAN, Y. - Circuitos Eléctricos. Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP, pp. 343. Campinas - SP, 1991.
- [23] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION - Electrical Transmission and Distribution. East Pittsburgh, Pa., vol. 1, 1967.
- [24] ELETROBRÁS - Controle de Tensão de Sistemas de Distribuição. CODI, vol. 5, pp. 145. Editora Campus - Rio de Janeiro, 1985.
- [25] ELETROBRÁS - Planejamento de Sistemas de Distribuição. CODI, vol. 1, pp. 202. Editora Campus - Rio de Janeiro, 1985.
- [26] GÖNEN, TURAN - Electric Power Distribution System Engineering. 1<sup>a</sup> ed., pp. 733. McGraw-Hill, New York, 1986.

- [27] RESENDE, J.W. - Otimizações da Compensações Série e em Derivação nas Linhas Aéreas de Transmissão de Energia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá - MG, 1979.
- [28] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION - Electric Utility Engineering Reference Book - Distribution systems. vol. 3, Pa., East Pittsburg, 1965.
- [29] ELETROBRÁS, EFEI, FUPAI - Compensação de Reativos. Relatório Contrato 443/87, FUPAI, pp.70, Itajubá - MG, 1987.
- [30] ELETROBRÁS - DEDI - Metodologia para Planejamento de Sistema Aéreo de Distribuição. Publicação do DEDI/ELETROBRÁS, Nota Técnica 02, 1983.
- [31] BBC - BROWN BOVERY. Manual de las Instalaciones de Distribución de Energía Eléctrica. 1<sup>a</sup> ed., pp. 555, Alemanha, 1979.
- [32] ANDREAS, J.C. - Energy - Efficient Electric Motors. pp.196, Gould, Marcel Dekker Inc., New York, 1982.
- [33] ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ - Cargas Elétricas Especiais. CESE - EFEI, Apostila. Itajubá - MG, 1993.
- [34] GOULART, J. - Tópicos em Matemática Aplicada. Apostila, EFEI. Itajubá - MG, 1993.
- [35] SALMEN, F.A. - Aplicação de Capacitores Série em Sistemas Elétricos de Alta Tensão. Tese de Mestrado (EFEI - Itajubá - MG, 1979). Rio de Janeiro, 1979.

## APÊNDICE A

### TEORIA BÁSICA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

Seja o seguinte circuito mostrando um alimentador radial (Fig. A.1), com a carga concentrada no extremo final.

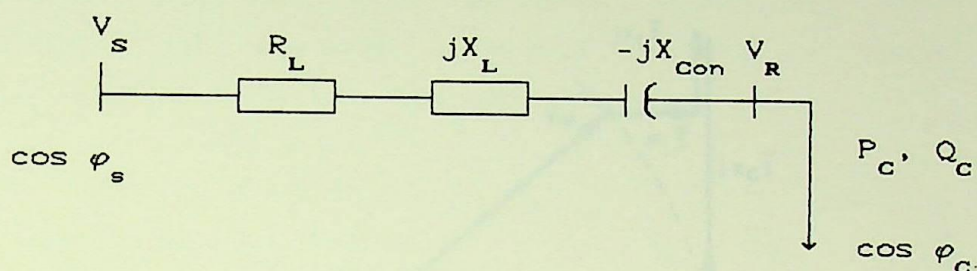


Fig A.1 - Esquema do Circuito Monofásico de um Alimentador Radial com Capacitor Série e Carga Concentrada no Extremo Final.

Um alimentador deste tipo pode ser representado com o diagrama fasorial tal como mostra a Fig. A.2.

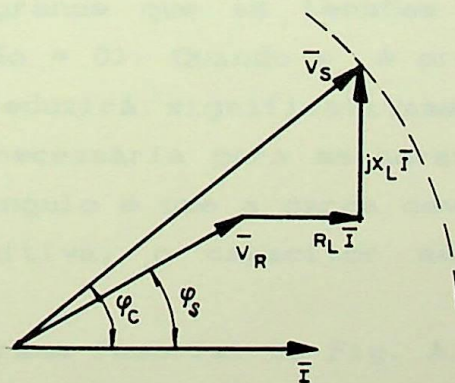


Fig. A.2 - Diagrama Fasorial de Tensões para o Alimentador Radial sem Capacitor Série.

Quando um capacitor série com reatância  $-X_{\text{con}}$  é agora instalado, o diagrama fasorial da Fig. A.3 é obtido. Este diagrama é desenhado tendo em conta que  $V_S$  é mantido constante e que  $\varphi_c$  e  $I$  não mudam. Quando comparamos os diagramas fasoriais (Fig. A.2 e Fig. A.3) pode-se observar que o capacitor série tem igualado os módulos das tensões  $V_S$  e  $V_R$ , reduzindo, ao mesmo tempo, a queda de tensão e melhorando o fator de potência ( $\cos \varphi_s$ ) no extremo de alimentação.

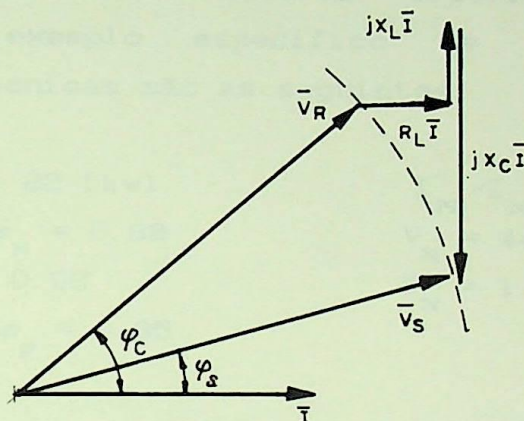


Fig. A.3 - Diagrama Fasorial de Tensões para um Alimentador Radial com Capacitor Série.

Pode-se observar, também, que se o ângulo  $\varphi_c$  é grande, é possível, teoricamente, fazer a reatância  $X_{\text{con}}$  do capacitor série tão grande que as tensões  $V_S$  e  $V_R$  sejam iguais (queda de tensão = 0). Quando  $\varphi_c$  é próximo a zero, o capacitor série não reduzirá significativamente a queda de tensão. Uma condição necessária para melhorar a tensão para qualquer grandeza do ângulo é que a carga deve ser indutiva. Para uma carga capacitiva, o capacitor série reduzirá a tensão  $V_R$ .

No diagrama fasorial da Fig. A.3 assume-se que a corrente  $I$  foi a mesma depois de inserir o capacitor série. Geralmente, quando a carga é constante, um incremento na tensão  $V_R$  é acompanhado por uma redução da corrente  $I$ .

## APÊNDICE B

### A COMPENSAÇÃO SÉRIE NO REGIME NOMINAL E NA PARTIDA DOS MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

#### B.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para analisar a compensação série nos diferentes regimes dos motores elétricos de indução escolhemos um exemplo específico de um motor cujas especificações técnicas são as seguintes:

$$\begin{array}{ll}
 P_N = 22 \text{ [kW]} & I_{PD} / I_N = 8.3 \\
 \text{Cos } \varphi_N = 0.88 & V_N = 440 \text{ [V]} \\
 \eta_N = 0.92 & W_N = 1.913 \text{ [kW]} \\
 \text{Cos } \varphi_p = 0.35 &
 \end{array}$$

#### B.2 - COMPENSAÇÃO EM REGIME NOMINAL

a) Cálculos prévios

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \text{Cos } \varphi_N \cdot \eta_N} = \frac{22000}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0.88 \cdot 0.92} \quad (\text{B.1})$$

$$I_N = 35.7 \text{ A} \quad (\text{B.2})$$

De aqui como  $\text{Cos } \varphi_N = 0.88$

$$\bar{I}_N = 35.7 \text{ Cos } \varphi_N + j 35.7 \text{ Sen } \varphi_N \quad (\text{B.3})$$

$$\bar{I}_N = 31.4 + j 17 \text{ A}$$

A impedância representativa do motor por fase será:

$$\bar{Z}_m = \frac{440/\sqrt{3}}{31.4 + j 17} \quad (\text{B.4})$$

$$\bar{Z}_m = 6.35 + j 3.44 \ \Omega \quad (\text{B.5})$$

b) Ligando o motor a um alimentador de características

$R_L = 0.3 \ [\Omega]$  e  $X_L = 0.6 \ [\Omega]$  logo a queda de tensão no alimentador é:

$$\Delta V = I_{NP} \times R_L + I_{NQ} \cdot X_L = 31.4 \times 0.3 + 17 \times 0.6$$

$$\Delta V = 19.62 \ \text{V}$$

c) Para compensar a queda de tensão no regime nominal.

Na figura B.1 temos o circuito do alimentador capacitor e motor.

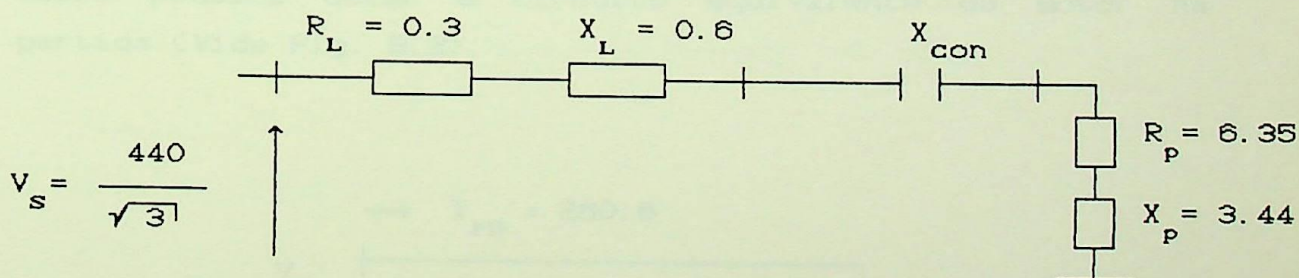


Fig B.1 - Circuito Equivalente ao Alimentador com Capacitor e Motor

$$\Delta V = I_{NQ} X_{con} \quad (\text{B.7})$$

$$19.62 = 17 \times X_{\text{con}} \quad (\text{B.8})$$

$$X_{\text{con}} = 1.15 \text{ } [\Omega] \quad (\text{B.9})$$

Logo no regime nominal require-se um capacitor de  $1.15 \text{ } \Omega$  de reatância para compensar a queda de  $19.62 \text{ } \Omega$ .

### B.3 - COMPENSAÇÃO NA PARTIDA

a) De  $W_N = 1.913 \text{ } [\text{kw}]$

Logo as perdas na partida  $W_P$  é:

$$W_P = 0.95 + 0.95 (I_{\text{PD}} / I_N)^2 \text{ } [\text{kw}] \quad (\text{B.10})$$

$$W_P = 0.95 + 0.95 \times 8.3^2 = 64.000 \quad (\text{B.11})$$

A corrente de partida do motor é:

$$I_{\text{PD}} = 31.4 \times 81.3 \quad (\text{B.12})$$

$$I_{\text{PD}} = 260.6 \text{ } \text{A} \quad (\text{B.13})$$

Assim podemos obter o circuito equivalente do motor na partida (Vide Fig. B.2).

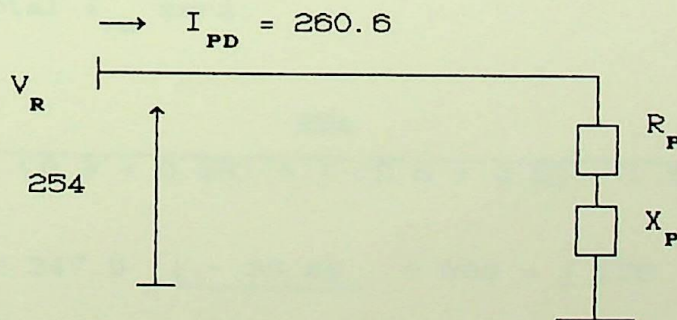


Fig B.2 - Circuito Equivalente ao Motor na Partida

$$3 \times R_P \times I_{PD}^2 = 64.000 \quad (B.14)$$

$$R_P = 0.33 \Omega \quad (B.15)$$

$$b) \text{ Como } I_{PD} = 260.6 = \frac{254}{\sqrt{R_P^2 + X_P^2}} \quad (B.16)$$

Logo:

$$X_P = 0.92 \Omega \quad (B.17)$$

c) O circuito equivalente do alimentador, capacitor e motor na partida é mostrado na Fig. B.3

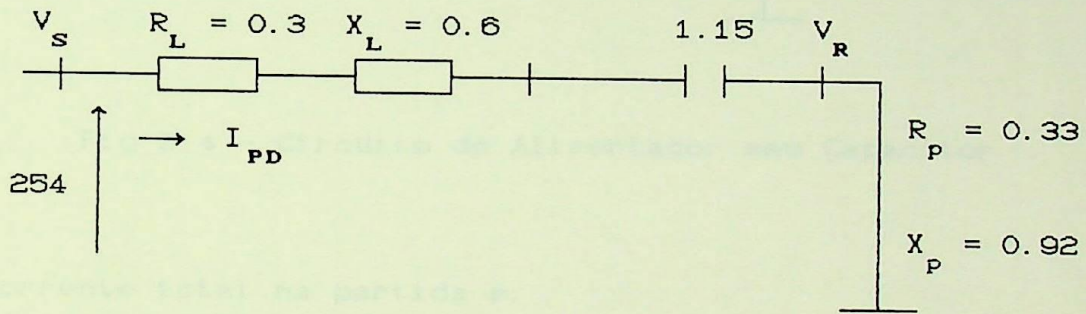


Fig B.3 - Circuito do Alimentador com Capacitor

A corrente total  $I_{PD}$  será:

$$I_{PD} = \frac{254}{(0.3 + 0.33) + j(0.6 + 0.92 - 1.55)} \quad (B.18)$$

$$I_{PD} = 347.9 \sqrt{-30.42} = 300 - j 176 \quad (B.19)$$

Logo a queda de tensão no alimentador é:

$$\Delta V = 0.3 \times 300 - 0.55 \times 176 = - 6.8 \text{ V} \quad (\text{B.20})$$

#### B.4 - PARTIDA SEM COMPENSAÇÃO

O circuito equivalente só do alimentador e motor é vide Fig. B.4.

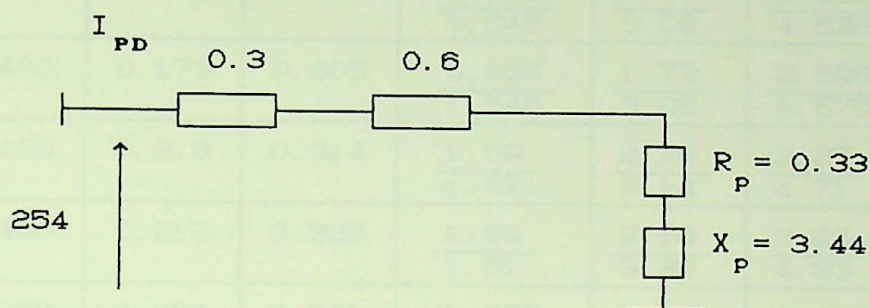


Fig B.4 - Circuito do Alimentador sem Capacitor

A corrente total na partida é:

$$I_{PD} = \frac{254}{0.63 + j 1.52} \quad (\text{B.21})$$

$$I_{PD} = 59.3 - j 143 \text{ A} \quad (\text{B.22})$$

A queda de tensão :

$$\Delta V = 0.3 \times 59.3 + 0.6 \times 143 \quad (\text{B.23})$$

$$\Delta V = 104 \text{ V} \quad (\text{B.24})$$

## APÉNDICE C

## CARACTERÍSTICAS DE CONDUTORES DE COBRE

mm <sup>2</sup>	AWG	No fios	[A]	R <sub>L</sub> Ω/km	X <sub>L</sub> Ω/km	Alimentador [km]			
						$\frac{R_L}{X_L}$			
						5	10	15	25
107.22	4/0	19	480	0.173	0.309	$\frac{0.865}{1.545}$	$\frac{1.73}{3.09}$	$\frac{2.595}{4.635}$	$\frac{4.325}{7.725}$
107.22	4/0	12	490	0.173	0.305	$\frac{0.865}{1.545}$	$\frac{1.73}{3.05}$	$\frac{2.595}{4.575}$	$\frac{4.325}{7.625}$
85.02	3/0	12	420	0.218	0.314	$\frac{1.09}{1.57}$	$\frac{2.18}{3.14}$	$\frac{3.27}{4.71}$	$\frac{5.45}{7.85}$
85.02	3/0	7	420	0.218	0.322	$\frac{1.09}{1.61}$	$\frac{2.18}{3.22}$	$\frac{3.27}{4.83}$	$\frac{5.45}{8.05}$
67.44	2/0	7	360	0.273	0.331	$\frac{1.365}{1.655}$	$\frac{2.73}{3.31}$	$\frac{4.095}{4.965}$	$\frac{6.825}{8.275}$
53.41	1/0	7	310	0.345	0.339	$\frac{1.725}{1.695}$	$\frac{3.45}{3.39}$	$\frac{5.175}{5.085}$	$\frac{8.625}{8.475}$
42.41	1	7	270	0.434	0.348	$\frac{2.17}{1.74}$	$\frac{4.34}{3.48}$	$\frac{6.51}{5.22}$	$\frac{10.85}{8.7}$
33.63	2	7	230	0.548	0.357	$\frac{2.74}{1.785}$	$\frac{5.48}{3.57}$	$\frac{8.22}{5.355}$	$\frac{13.7}{8.925}$
26.67	3	7	200	0.691	0.365	$\frac{3.455}{1.825}$	$\frac{6.91}{3.65}$	$\frac{10.365}{5.475}$	$\frac{17.275}{9.125}$
21.15	4	3	180	0.863	0.372	$\frac{4.315}{1.86}$	$\frac{8.63}{3.72}$	$\frac{12.945}{5.58}$	$\frac{21.57}{9.3}$
16.77	5	3	150	1.0876	0.381	$\frac{5.438}{1.905}$	$\frac{10.87}{3.81}$	$\frac{16.314}{5.715}$	$\frac{27.15}{9.525}$
13.3	6	3	130	1.374	0.390	$\frac{6.87}{1.95}$	$\frac{13.74}{3.90}$	$\frac{20.61}{5.85}$	$\frac{34.35}{9.75}$
10.55	7	1	110	1.709	0.405	$\frac{8.545}{2.025}$	$\frac{17.09}{4.05}$	$\frac{25.365}{6.075}$	$\frac{42.73}{10.125}$
8.37	8	1	90	2.157	0.413	$\frac{10.785}{2.065}$	$\frac{21.57}{4.13}$	$\frac{32.355}{6.195}$	$\frac{53.925}{10.32}$

## APÊNDICE D

### O BANCO DE TESTES

#### D.1 - INTRODUÇÃO

Para o Estudo Experimental da Compensação série nos Alimentadores do Sistema elétrico de distribuição foi necessário fazer a montagem de um modelo elétrico dos alimentares para verificar a teoria da compensação série. O referido banco foi montado no laboratório do IEE da Escola Federal de Engenharia de Itajubá (vide Figs. D2 e D3). Neste apêndice apresentamos resumidamente as características técnicas e vistas fotográficas dos componentes do banco.

#### D.2 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS COMPONENTES

##### D.2.1 - RESISTÊNCIAS VARIÁVEIS

As resistências variáveis são aquelas usadas em trabalhos prévios [35] e é mostrado nas Figs. D2, D3 e D5. Elas são caracterizadas pelas especificações técnicas seguintes:

- 3 Resistências de manivela - ELETELE - 30  $\Omega$ , 6.45 A, 1250 W
- 3 Resistências variáveis - ELETELE - 500  $\Omega$ , 1 A
- 3 Resistências variáveis - ELETELE - 20  $\Omega$ , 5 A
- 1 Banco de resistências fixas - ANELSA - 6 x 142  $\Omega$ , 9.3 A, 2 kw.
- 3 Bancos de resistências fixas - 4 x 400  $\Omega$ , 1 x 200  $\Omega$ , 2 x 100  $\Omega$ .

Estas resistências são associadas entre elas em diferentes conexões para conformar a resistência do

alimentador ou a carga segundo o requerimento.

## D.2.2 - INDUTÂNCIAS

No banco temos dois tipos de indutâncias, aquelas de núcleo variável e os outros de núcleo fixo. Nas Figs. D2, D4 e D5 mostram-se as indutâncias e nelas pode-se observar alguns detalhes construtivos. As especificações técnicas das indutâncias fixas são as seguintes:

- 3 Indutâncias de Núcleo variável (vide figura D.1 das características levantadas).
- 3 Bancos de Indutâncias de núcleo retangular Ultra-Sinus com 4 x 1240 mH, 1 x 620 mH e 1 x 310 mH.
- 2 Bancos de Indutâncias de núcleo retangular - PANAMBRA - cada um com 9 indutâncias de 10 mH.
- Indutâncias toroidais individuais de 40 mH - 5A, 30 mH - 5A, 30 mH - 3A.

No caso das indutâncias de núcleo variável na Fig. D.1 apresenta-se a variação da indutância segundo o tipo de conexão dos enrolamentos do reator e a posição do núcleo. Nessas curvas características destaca-se também a variação da indutância com a injeção da corrente nos rolamentos do reator. As curvas permitem ter a priori o valor da indutância para um teste determinado.

## D.2.3 - CAPACITORES

Nas Figs. D2 e D3 mostra-se os bancos de capacitores que são conexões de capacitâncias individuais cujas características são as seguintes:

- 4 Capacitores individuais com as especificações  
ICONTRON - 50  $\mu$ F,  $V_N = 560$  Vac.,  $V_{ef} = 440$  V.
- 2 Capacitores - ICOTRON - 30  $\mu$ F,  $V_N = 560$  Vac.,  $V_{ef} = 440$  V

- 4 Capacitores - ICOTRON -  $10 \mu\text{F}$ ,  $V_N = 560 \text{ Vac.}$ ,  $V_{ef} = 440\text{V}$
- 2 Bancos de Capacitores - cada um com 9 capacitores PANAMBRA -  $10 \mu\text{F}$  -  $220 \text{ v}$
- 3 Bancos de Capacitores - Cada um com  $4 \times 5 \mu\text{F}$ ,  $1 \times 10 \mu\text{F}$  e  $2 \times 20 \mu\text{F}$

## D.2.4 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Os instrumentos requeridos no banco são os seguintes:

- 4 Wattímetros
- 1 Transformador de corrente
- 1 Transformador de tensão
- 6 Voltímetros
- 1 Ponte Shering
- 3 Amperímetros
- 2 Miliamperímetros
- 2 Variadores de tensão (Auto-Transformadores)
- 1 Plotador

Esta instrumentação previamente verificada e montada segundo os esquemas elétricos apresentados no item 3.3 de procedimentos de ensaios do Capítulo III.

Outros equipamentos:

- 1 Motor EBERLE - trifásico.  
1 cv, 1715 RPM, 220 V, conexão  $\Delta$ - $\Delta$ , 3.8 A,  $I_{PD}/I_n = 6$

Dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado:

$$R_1 = 2.16 [\Omega]$$

$$R_2 = 2.23 [\Omega]$$

$$L_1 = 0.0057559 [\text{H}]$$

$$L_2 = 0.0059416 [\text{H}]$$

$$T_p = 0.7 [\text{s}]$$

\_ 1 motor monofásico sem especificações

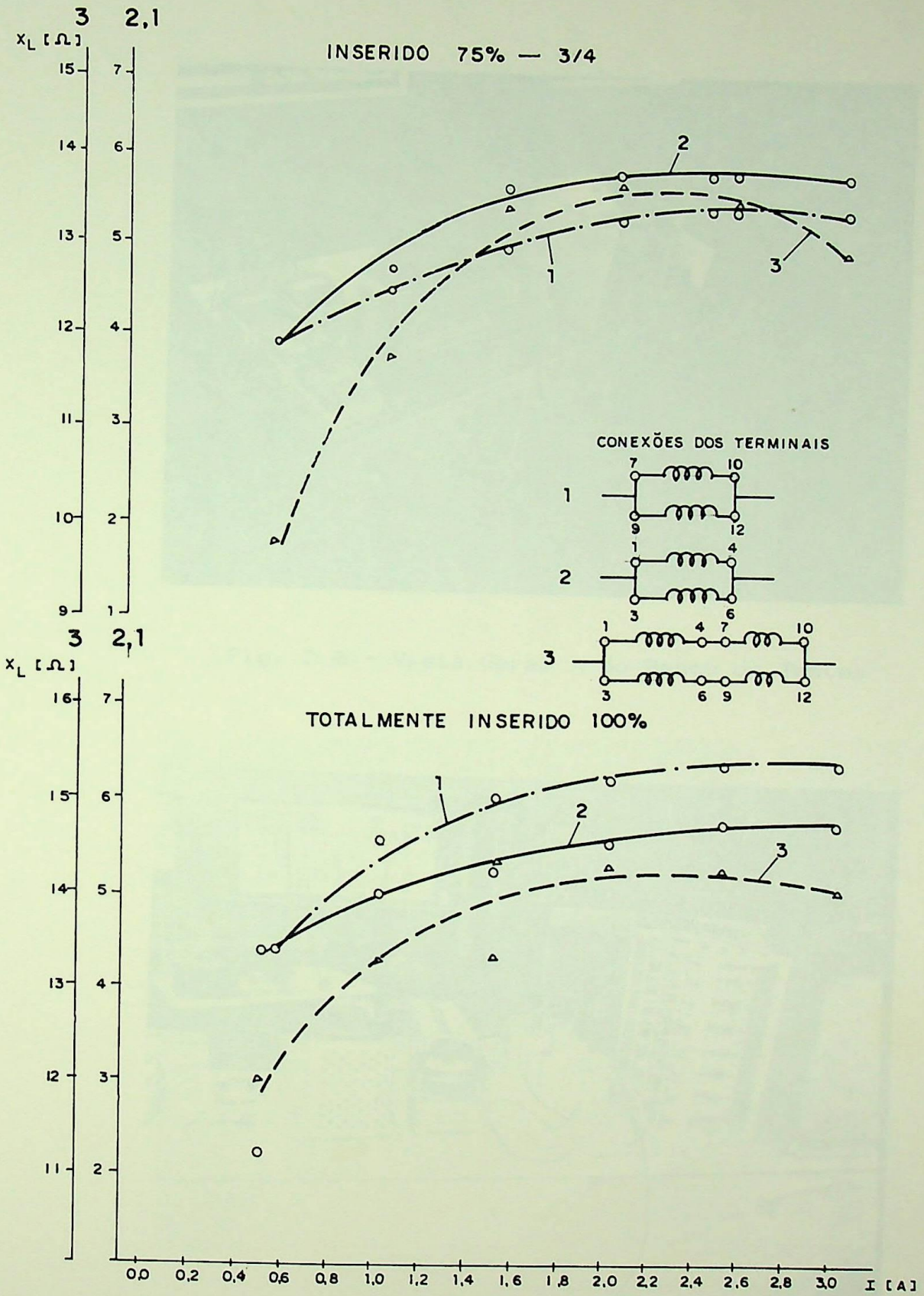


Fig. D.1 - Gráfico da Variação de Indutância com a Posição do Núcleo nos Reatores Variáveis.

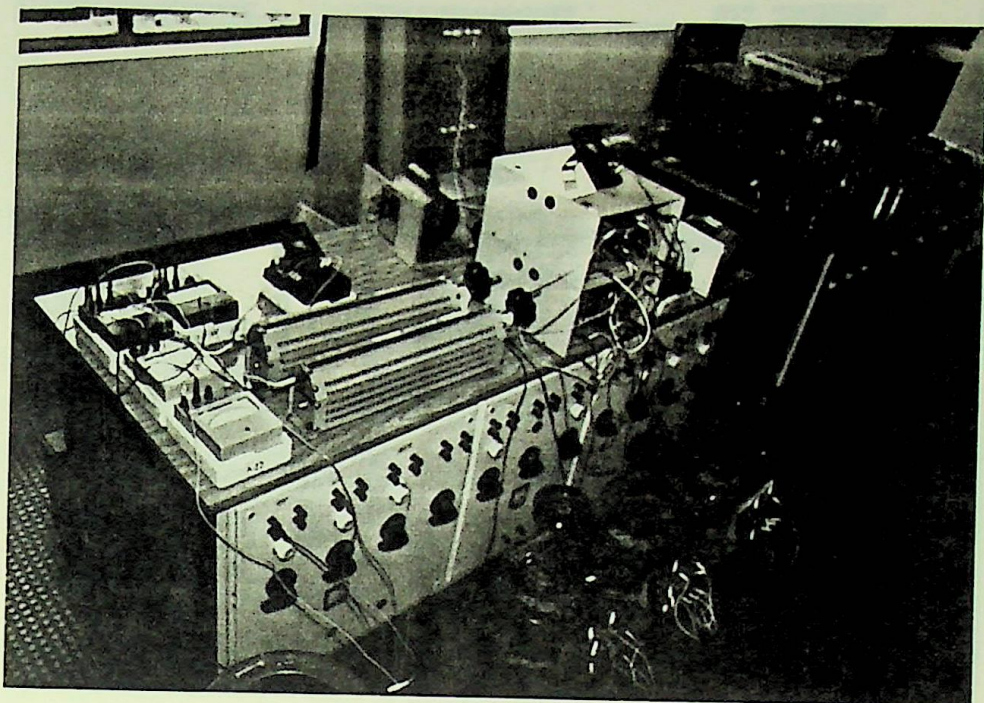


Fig. D.2 - Vista Geral A do Banco de Testes

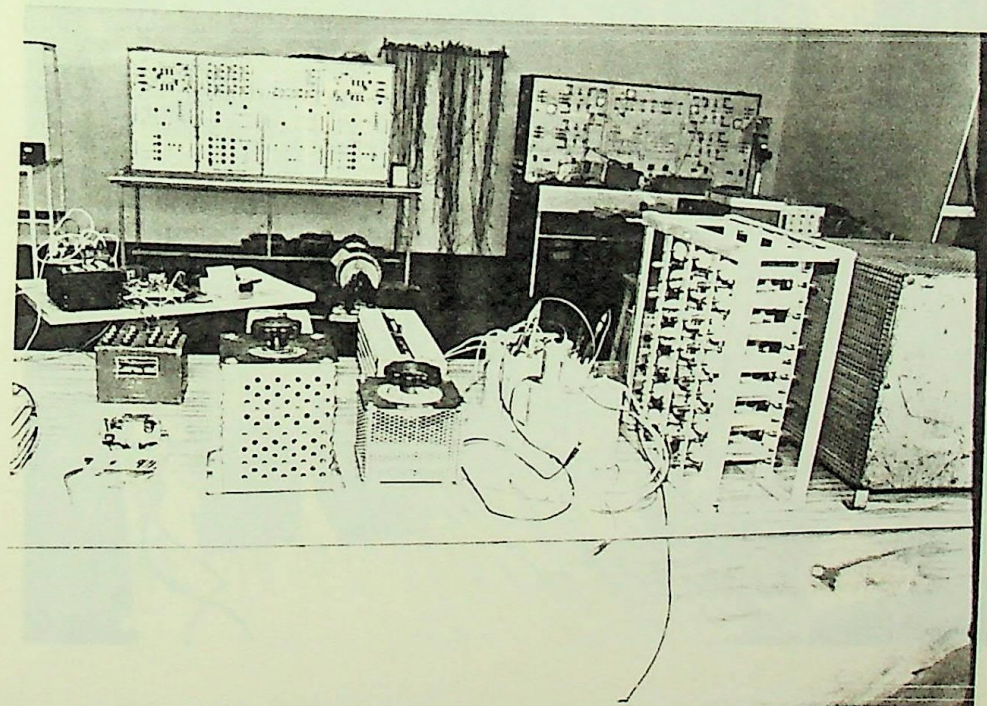


Fig. D.3 - Vista Geral B do Banco de Testes

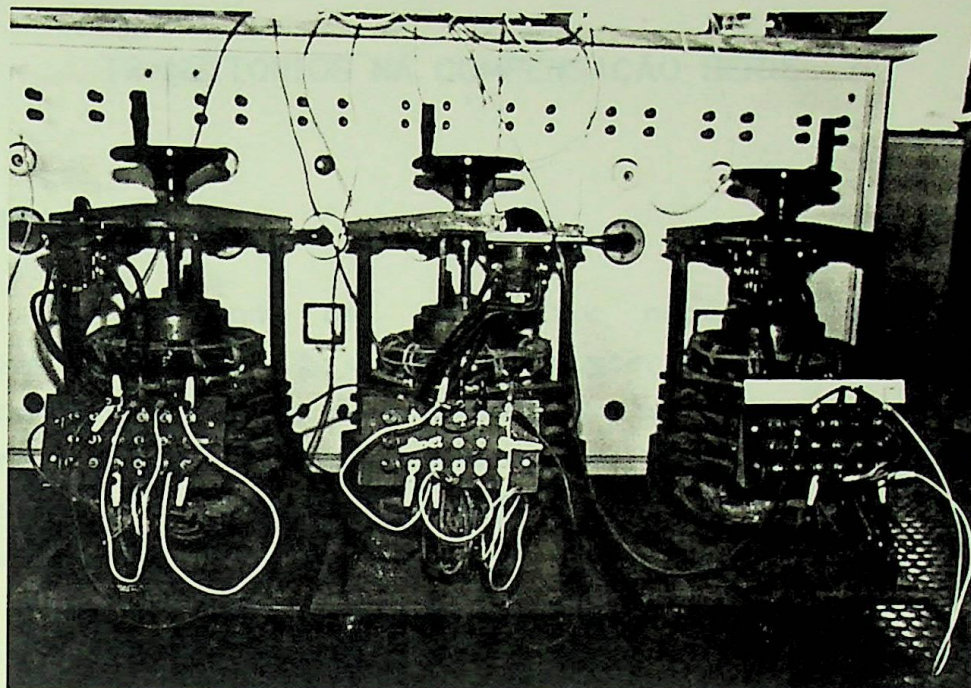


Fig. D.4 - Vista dos Reatores de Núcleo Variável

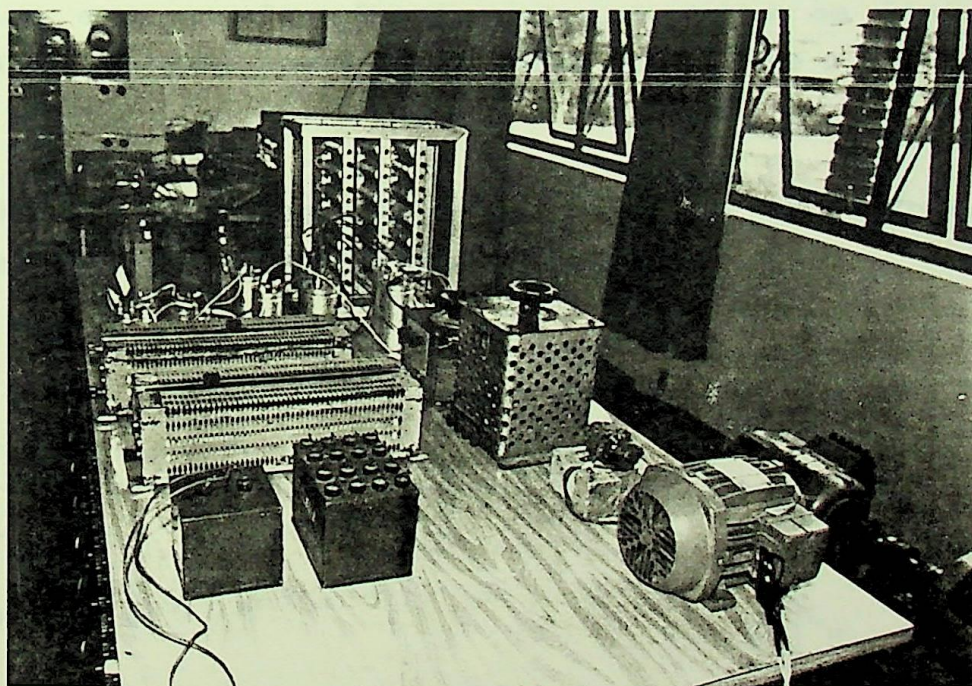


Fig. D.5 - Vista do Conjunto de Componentes Utilizados no Banco de Testes

## APÊNDICE E

## TRANSITÓRIOS NA COMPENSAÇÃO SÉRIE

## E.1 - INTRODUÇÃO

Visando dar uma maior cobertura ao estudo feito nos Capítulos II e III da dissertação, apresenta-se neste apêndice o estudo de transitórios na compensação série. Assim, realiza-se um estudo completo da partida de motores e apresenta-se a formulação matemática no caso de sobretensões nos capacitores.

Existem, atualmente, meios informáticos (softwares) para simular os transitórios em sistemas elétricos, como o EMTP\_ATP, MICROCAD - TUTSIM, entre outros. Mas para melhor entendimento e compreensão do problema de transitórios na compensação série. Desenvolve-se a modelagem matemática utilizando-se as Transformadas de Laplace, o algoritmo e a codificação da mesma é feita em linguagem FORTRAN para alguns casos e em outros utiliza-se o EMTP\_ATP.

## E.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA PARA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

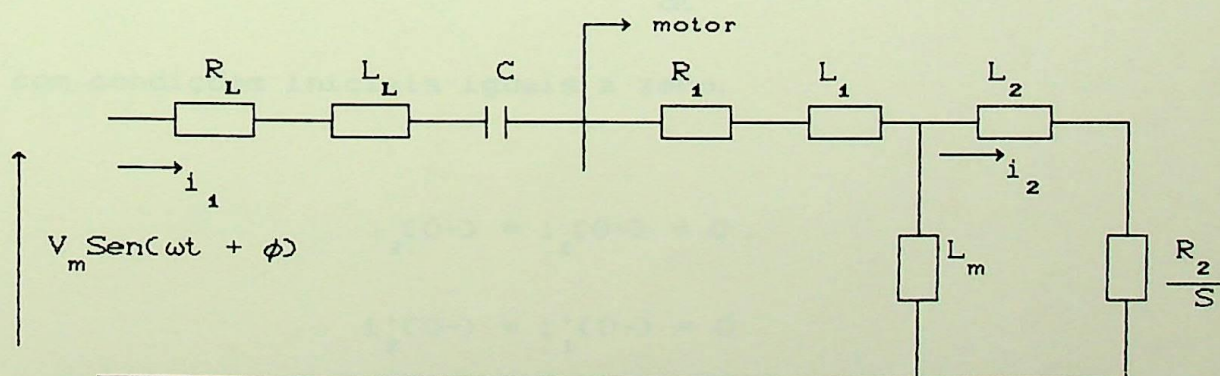


Fig. E.1 - Circuito Equivalente da Fonte, Alimentador e Motor.

Aplicando as equações de Correntes de Malhas no circuito acima, tem-se:

$$V_m \text{Sen}(\omega t + \phi) = R_L i_1 + L_L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt +$$

$$+ R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \left( \frac{d(i_1 - i_2)}{dt} \right) \quad (\text{E. 01})$$

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{R_2}{e} i_2 + L_m \left( \frac{d(i_1 - i_2)}{dt} \right) \quad (\text{E. 02})$$

$\downarrow$   
 $s = e$

Derivando (E. 01)

$$V_m \omega \text{Cos}(\omega t + \phi) = R_L \frac{di_1}{dt} + L_L \frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{i_1}{C} + R_1 \frac{di_1}{dt} +$$

$$+ L_1 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + L_m \frac{d^2 i_1}{dt^2} - L_m \frac{d^2 i_2}{dt^2} \quad (\text{E. 03})$$

Associando tem-se:

$$V_m \omega \text{Cos}(\omega t + \phi) = (R_L + R_1) \frac{di_1}{dt} + (L_L + L_1 + L_m) \frac{d^2 i_1}{dt^2} +$$

$$+ \frac{i_1}{C} - L_m \frac{d^2 i_2}{dt^2} \quad (\text{E. 03'})$$

com condições iniciais iguais a zero.

$$i_2(0^-) = i_1(0^-) = 0$$

$$i_2'(0^-) = i_1'(0^-) = 0$$

tomando Laplace a (E.03) e (E.02)

$$V_m \omega \left[ \frac{S \cos \phi - \omega \operatorname{Sen} \phi}{S^2 + \omega^2} \right] = (R_L + R_1) S I_1(S) + \\ (L_L + L_1 + L_m) S^2 I_1(S) + \frac{I_1(S)}{C} - L_m S^2 I_2(S) \quad (\text{E.04})$$

$$0 = L_2 S I_2(S) + \frac{R_2}{e} I_2(S) + L_m S I_2(S) - L_m S I_1(S) \quad (\text{E.05})$$

de (E.5)

$$I_2(S) = \frac{L_m S I_1(S)}{(L_2 + L_m) S + \frac{R_2}{e}} \quad (\text{E.06})$$

Fazendo:

$$R_L + R_1 = \alpha$$

$$L_L + L_1 + L_m = \beta$$

$$L_2 + L_m = \lambda$$

$$\frac{R_2}{e} = \theta$$

(E.6) em (E.4)

$$V_m \omega \left[ \frac{S \cos \phi - \omega \operatorname{Sen} \phi}{S^2 + \omega^2} \right] = \frac{I_1(S)}{\lambda S + \theta} \left[ (\alpha \lambda S^2 + \right. \\ \left. + \theta \alpha S) + \beta \lambda S^3 + \beta \theta S^2 - L_m^2 S^3 + \frac{\lambda S + \theta}{C} \right] \quad (\text{E.07})$$

simplificando:

$$V_m \omega \left[ \frac{S \cos \phi - \omega \operatorname{Sen} \phi}{S^2 + \omega^2} \right] = \frac{I_1(S)}{(\lambda S + \theta) C} \left[ S^3 (C \beta \lambda - L_m^2 C) + S^2 (C \alpha \lambda + \beta \theta C) + S (\theta C \alpha + \lambda) + \theta \right] \quad (\text{E.08})$$

$$V_m \omega \left[ \frac{S \cos \phi - \omega \operatorname{Sen} \phi}{S^2 + \omega^2} \right] = \frac{I_1(S) (C \beta \lambda - L_m^2 C)}{(\lambda S + \theta) C} \left[ S^3 + \frac{S^2 (C \alpha \lambda + \beta \theta)}{(C \beta \lambda - L_m^2 C)} + \frac{S (\theta C \alpha + \lambda)}{(C \beta \lambda - C L_m^2 C)} + \frac{\theta}{(C \beta \lambda - C L_m^2 C)} \right] \quad (\text{E.09})$$

logo:

$$I_1(S) = \left[ \frac{1}{S^3 + S^2 \frac{(C \alpha \lambda + \beta \theta)}{(C \beta \lambda - L_m^2 C)} + \frac{S (\theta C \alpha + \lambda)}{(C \beta \lambda - C L_m^2 C)} + \frac{\theta}{(C \beta \lambda - C L_m^2 C)}} \right]$$

$$V_m \omega \times \left[ \frac{S \cos \phi - \omega \operatorname{Sen} \phi}{S^2 + \omega^2} \right] \times \left[ \frac{\lambda S + \theta}{\beta \lambda - L_m^2} \right] \quad (\text{E.10})$$

de:

$$S^3 + a_1 S^2 + a_2 S^2 + a_2 S + a_3 = 0 \quad (\text{E.11})$$

$$a_1 = \frac{\alpha \lambda + \beta \theta}{\beta \lambda - L_m^2}; \quad a_2 = \frac{\theta C \alpha + \lambda}{C \beta \lambda - C L_m^2};$$

$$a_3 = \frac{\theta}{C \beta \lambda - C L_m^2}$$

$$Q = \frac{3a_2 - a_1^2}{9}$$

$$R = \frac{9a_1 a_2 - 27a_3 - 2a_1^3}{54}$$

$$D = Q^3 + R^2 \quad (\text{E.12})$$

quando  $D > 0$

$$S = \sqrt[3]{R + \sqrt{Q^3 + R^2}} \quad (\text{E.13})$$

$$T = \sqrt[3]{R - \sqrt{Q^3 + R^2}} \quad (\text{E.14})$$

As soluções de (E.11) serão:

$$x_1 = S + T - 1/3 a_1 \quad (\text{E.15})$$

$$x_2 = -1/2 (S+T) - 1/3 a_1 + 1/2 i \sqrt{3} (S-T) \quad (\text{E.16})$$

$$x_3 = -1/2 (S+T) - 1/3 a_1 - 1/2 i \sqrt{3} (S-T) \quad (\text{E.17})$$

Fazendo:

$$AA = -1/2 (S + T) - 1/3 a_1 \quad (\text{E.18})$$

$$BB = 1/2 \sqrt{3} (S - T) \quad (\text{E.19})$$

logo:

$$I_1(S) = \frac{V_m \omega (S \cos \phi - \omega \text{Sen } \phi)(\lambda S + \theta)}{(\beta \lambda - L_m^2)(S+j\omega)(S-j\omega)(S-x_1)(S-AA-jBB)(S-AA+jBB)} \quad (\text{E.20})$$

$I_1(s)$  toma a forma seguinte:

$$I_1(S) = \frac{C_1}{S + j\omega} + \frac{C_2}{S - j\omega} + \frac{C_3}{S - x_1} + \frac{C_4}{S - AA - jBB} + \frac{C_5}{S - AA + jBB} \quad (E. 21)$$

$$C_1 = \lim_{s \rightarrow -j\omega} I_1(S) (S + j\omega) = \frac{V_m \omega}{2(\beta\lambda - L_m^2)} \times$$

$$\frac{(\text{Sen } \phi + j \text{ Cos } \phi) (\theta - j\lambda\omega)}{(\omega - jx_1) [AA + j(\omega + BB)] [AA + j(\omega - BB)]} \quad (E. 22)$$

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow j\omega} I_1(S) (S - j\omega) = \frac{V_m \omega}{2(\beta\lambda - L_m^2)} \times$$

$$\frac{(-\text{Sen } \phi + j \text{ Cos } \phi) (\theta - j\lambda\omega)}{(\omega + jx_1) [AA - j(\omega - BB)] [AA - j(\omega + BB)]} \quad (E. 23)$$

$$C_3 = \lim_{s \rightarrow x_1} I_1(S) (S - x_1) = \frac{V_m \omega}{(\beta\lambda - L_m^2)} \times$$

$$\frac{(x_1 \text{ Cos } \phi - \omega \text{ Sen } \phi)(\theta + \lambda x_1)}{(x_1 + j\omega)(x_1 - j\omega) [x - AA - jBB] [x_1 - AA + jBB]} \quad (E. 24)$$

$$C_4 = \lim_{s \rightarrow AA + jBB} I_1(S) (S - A - jB) = \frac{V_m \omega}{2(\beta\lambda - L_m^2)} \times$$

$$\frac{[CAA \text{ Cos } \phi - \omega \text{ Sen } \phi] + j B \text{ Cos } \phi}{[AA + j(\omega + B)] [AA + j(CBB - \omega)] [AA - x_1 + jBB] [jBB]} \quad (E. 25)$$

$$C_5 = \lim_{s \rightarrow AA - jBB} I_1(S) (S - AA + jBB) = \frac{V_m \omega}{2(\beta\lambda - L_m^2)} \times$$

$$\frac{[(\omega \text{ Sen } \phi - AA \text{ Cos } \phi) + j B \text{ Cos } \phi] [\lambda AA + \theta - j \lambda BB]}{[AA + j(\omega - BB)] [AA + j(\omega + BB)] [AA - x_1 - jBB] [jBB]} \quad (\text{E. 26})$$

Finalmente chega-se à forma seguinte de  $I_1(t)$ :

$$I_1(t) = (C_1 + C_2) \text{Cos } \omega t - j(C_1 - C_2) \text{Sen } \omega t + C_3 e^{x_1 t} + \\ + (C_4 + C_5) e^{AA t} \text{Cos}(BBt) - j(C_4 - C_5) e^{AA t} \text{Sen}(BBt) \quad (\text{E. 27})$$

Nesta expressão estão juntas a resposta natural e forçada da corrente do motor.

Quando  $D < 0$  pode-se simplificar a solução com:

$$x_1 = 2 \sqrt{-Q} \cdot \text{Cos} \left( \frac{1}{3} \theta \right) \quad (\text{E. 28})$$

$$x_2 = 2 \sqrt{-Q} \cdot \text{Cos} \left( \frac{1}{3} \theta + 120 \right) \quad (\text{E. 29})$$

$$x_3 = 2 \sqrt{-Q} \cdot \text{Cos} \left( \frac{1}{3} \theta + 240 \right) \quad (\text{E. 30})$$

onde:  $\text{Cos } \theta = - \left( R / \sqrt{-Q^3} \right) \quad (\text{E. 31})$

Então  $I_1(t)$  toma a forma seguinte:

$$I_1(t) = \frac{C_1}{S + j\omega} + \frac{C_2}{S - j\omega} + \frac{C_3}{S - x_1} + \frac{C_4}{S - x_2} + \frac{C_5}{S - x_3} \quad (\text{E. 32})$$

Para propósitos de programação, integra-se e deriva-se a expressão de  $I_1(t)$  (E. 32)

$$I_1(t) = (C_1 + C_2) \cos(\omega t) - j(C_1 - C_2) \sin(\omega t) + \\ + C_3 e^{x_1 t} + C_4 e^{x_2 t} + C_5 e^{x_3 t} \quad (\text{E. 33})$$

a derivada é:

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = -(C_1 + C_2)\omega \sin(\omega t) - j(C_1 - C_2)\omega \cos(\omega t) + \\ + C_3 x_1 e^{x_1 t} + C_4 x_2 e^{x_2 t} + C_5 x_3 e^{x_3 t} \quad (\text{E. 34})$$

a integração é:

$$\int I_1(t) dt = \frac{(C_1 + C_2)}{\omega} \sin \omega t + j \frac{(C_1 - C_2)}{\omega} \cos(\omega t) + \\ + \frac{C_3}{x_1} e^{x_1 t} + \frac{C_4}{x_2} e^{x_2 t} + \frac{C_5}{x_3} e^{x_3 t} \quad (\text{E. 35})$$

### E.3 - MODELAGEM MATEMÁTICA DE SOBRETENSÕES NOS CAPACITORES EM CASOS DE CURTO-CIRCUITOS.

As sobretensões ocorrem nos capacitores como consequência de curto-circuitos e chaveamentos ou defeitos dos capacitores.

Neste item apresenta-se as sobretensões produzidas por curto-circuitos na carga com e sem resistência do alimentador.

### E.3.1 - SOBRETENSÕES NOS CAPACITORES DEVIDO A CURTO-CIRCUITOS NA CARGA CONSIDERANDO A RESISTÊNCIA DO ALIMENTADOR

Seja o circuito

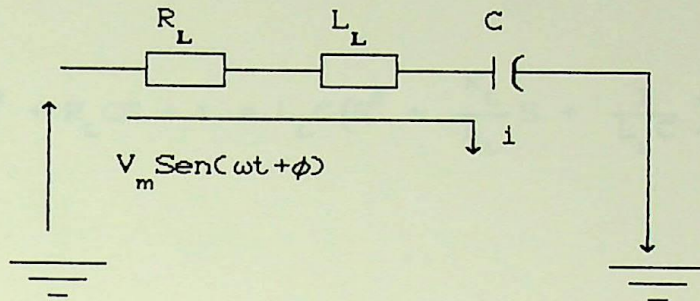


Fig. E.2 - Circuito Equivalente.

Aplicando a 2ª Lei de Kirchoff, tem-se:

$$L_L \frac{d^2 V_c}{dt^2} + R_L i + V_c = V_m \text{Sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{E. 36})$$

fazendo:

$$i = C \frac{dV_c}{dt}$$

$$L_L C \frac{d^2 V_c}{dt^2} + R_L C \frac{dV_c}{dt} + V_c = V_m \text{Sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{E. 37})$$

tomando Laplace:

$$L_L C [S^2 V_c(S) - S V_c(0) - V_c'(0)] + R_L C [S V_c(S) - V_c(0)] + V_c(S) = \frac{V_m \omega \text{Cos } \phi}{S^2 + \omega^2} + \frac{V_m S \text{Sen } \phi}{S^2 + \omega^2} \quad (\text{E. 38})$$

$$V_c(s) [L_L C s^2 + R_L C s + 1] = \frac{V_m \omega \cos \phi}{s^2 + \omega^2} + \frac{V_m s \sin \phi}{s^2 + \omega^2} +$$

$$+ L_L C s V_c(0) + L_L C V_c'(0) + R_L C V_c(0) \quad (\text{E. 39})$$

$$\Rightarrow L_L C s^2 + R_L C s + 1 = L_L C \left( s^2 + \frac{R_L}{L_L} s + \frac{1}{L_L C} \right)$$

mas:

$$s^2 + \frac{R_L}{L_L} s + \frac{1}{L_L C} = \left( s + \frac{R_L}{2L_L} \right)^2 - \left( \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right) \quad (\text{E. 40})$$

$$V_c(s) = \frac{V_m \omega \cos \phi}{L_L C \left\{ \left( s + \frac{R_L}{2L_L} \right)^2 - \left( \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right) \right\} (s^2 + \omega^2)} +$$

$$+ \frac{V_m s \sin \phi}{L_L C \left\{ \left( s + \frac{R_L}{2L_L} \right)^2 - \left( \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right) \right\} (s^2 + \omega^2)} +$$

$$+ \frac{s V_c(0)}{\left( s + \frac{R_L}{2L_L} \right)^2 - \left( \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right)} + \frac{V_c'(0)}{\left( s + \frac{R_L}{2L_L} \right)^2 - \left( \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right)} +$$

$$+ \frac{R_L}{L_L} \frac{V_c(0)}{\left( s + \frac{R_L}{2L_L} \right)^2 - \left( \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right)} \quad (\text{E. 41})$$

Fazendo:

$$\alpha_1^2 = \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \quad S + \frac{R_L}{2L_L} = \beta_1 \quad (\text{E. 42})$$

ou:

$$V_c(S) = \frac{V_m S \text{ Sen } \phi + V_m \omega \text{ Cos } \phi}{L_L C \left\{ \left[ S + \frac{R_L}{2L} \right]^2 - \left[ \frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C} \right] \right\} (S^2 + \omega^2)} \quad (\text{E. 43})$$

$$V_c(S) = \frac{(V_m / L_L C) S \text{ Sen } \phi + (V_m / L_L C) \omega \text{ Cos } \phi}{\left\{ \left[ S + \frac{R_L}{2L} \right]^2 - \alpha_1^2 \right\} (S^2 + \omega^2)} \quad (\text{E. 44})$$

$$\left( S + \frac{R_L}{2L} + \alpha_1 \right) \left( S + \frac{R_L}{2L} - \alpha_1 \right) (S + j\omega)(S - j\omega)$$

$$V_c(s) = \frac{A_1}{S + \frac{R_L}{2L_L} + \alpha_1} + \frac{A_2}{S + \frac{R_L}{2L_L} - \alpha_1} +$$

$$+ \frac{A_3}{S + j\omega} + \frac{A_4}{S - j\omega} \quad (\text{E. 45})$$

donde:

$$A_1 = \left[ \frac{V_m}{LC} \right] \frac{\left[ \left( -\frac{R_L}{2L_L} - \alpha_1 \right) \text{ Sen } \phi + \omega \text{ Cos } \phi \right]}{(-2\alpha_1) \left[ -\frac{R_L}{2L_L} - \alpha_1 + j\omega \right] \left[ -\frac{R_L}{2L_L} - \alpha_1 - j\omega \right]} \quad (\text{E. 46})$$

$$\text{para: } S = -\frac{R}{2L} - \alpha_1$$

$$A_2 = \left( \frac{V_m}{L_L C} \right) \frac{\left[ \left( -\frac{R_L}{2L_L} + \alpha_1 \right) \text{Sen } \phi + \omega \text{ Cos } \phi \right]}{(2\alpha_1) \left[ -\frac{R_L}{2L_L} + \alpha_1 + j\omega \right] \left[ -\frac{R_L}{2L_L} + \alpha_1 - j\omega \right]} \quad (\text{E. 47})$$

$$\text{para: } S = -\frac{R}{2L} + \alpha_1$$

$$A_3 = \left( \frac{V_m}{L_L C} \right) \frac{(-j\omega) \text{ Sen } \phi + \omega \text{ Cos } \phi}{(-j\omega + \frac{R_L}{2L_L} + \alpha_1) (-j\omega + \frac{R_L}{2L_L} - \alpha_1) (-2j\omega)} \quad (\text{E. 48})$$

$$\text{para: } S = -j\omega$$

$$A_4 = \left( \frac{V_m}{L_L C} \right) \frac{(j\omega) \text{ Sen } \phi + \omega \text{ Cos } \phi}{(j\omega + \frac{R_L}{2L_L} + \alpha_1) (j\omega + \frac{R_L}{2L_L} - \alpha_1) (2j\omega)} \quad (\text{E. 49})$$

$$\text{para: } S = j\omega$$

logo:

$$V_c(t) = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t} + (A_3 + A_4) \text{Cos}(\omega t) - j(A_3 - A_4) \text{Sen}(\omega t) \quad (\text{E. 50})$$

onde:

$$m_1 = -\frac{R_L}{2L_L} - \sqrt{\frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C}} \quad (\text{E. 51})$$

$$m_2 = -\frac{R_L}{2L_L} - \sqrt{\frac{R_L^2}{4L_L^2} - \frac{1}{L_L C}} \quad (\text{E. 52})$$

Na solução de  $V_c$  considera-se que as condições iniciais são:

$$V_c(0) = 0$$

$$I(0) = 0$$

### E.3.2 - SOBRETENSÕES NOS CAPACITORES SEM CONSIDERAR A RESISTÊNCIA DO ALIMENTADOR

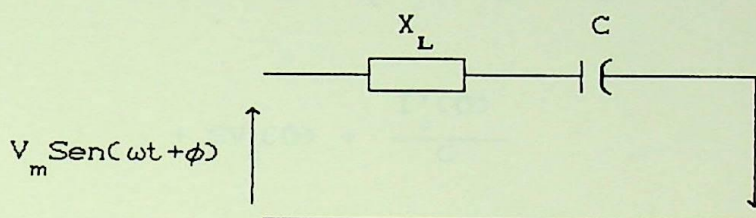


Fig. E.3 - Circuito Equivalente

$$L_L \frac{di}{dt} + V_c = V_m \text{ Sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{E. 53})$$

Fazendo:

$$I = C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{E. 53A})$$

$$L_L C \frac{d^2 V_c}{dt^2} + V_c = V_m \text{ Sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{E. 54})$$

tomando a transformada de Laplace:

$$L_L C (s^2 V_c(s) - sV_c(0) - V_c'(0)) + V_c(s) =$$

$$= V_m \frac{S \operatorname{Sen} \phi + \omega \operatorname{Cos} \phi}{S^2 + \omega^2} \quad (\text{E. 55})$$

de (E. 53A):

$$V_c'(0) = \frac{I_c'(0)}{C} \quad (\text{E. 56})$$

$$V_c(S) \left( S^2 + \frac{1}{L_L C} \right) = \frac{V_m}{L_L C} \left[ S \frac{\operatorname{Sen} \phi + \omega \operatorname{Cos} \phi}{S^2 + \omega^2} \right] + \\ + S V_c(0) + \frac{I_c'(0)}{C} \quad (\text{E. 57})$$

$$V_c(S) = \frac{V_m}{L_L C} \frac{S \operatorname{Sen} \phi + \omega \operatorname{Cos} \phi}{(S^2 + 1/L_L C)(S^2 + \omega^2)} + V_c(0) \frac{S}{S^2 + 1/L_L C} + \\ + \frac{I_c'(0)}{C(S^2 + 1/L_L C)} \quad (\text{E. 58})$$

$$V_c(S) = \frac{V_m}{L_L C} \frac{S \operatorname{Sen} \phi + \omega \operatorname{Cos} \phi}{(S^2 + 1/L_L C)(S^2 + \omega^2)} + V_c(0) \frac{S}{S^2 + 1/L_L C} + \\ + \frac{I_c'(0)}{C(S^2 + 1/L_L C)} \quad (\text{E. 59})$$

fazendo:

$$\frac{1}{L_L C} = B^2 \quad (\text{E. 60})$$

$$V_c(S) = \frac{V_m}{L_L C} \frac{S \text{ Sen } \phi + \omega \text{ Cos } \phi}{(S + jB)(S - jB)(S + j\omega)(S - j\omega)} +$$

$$+ \frac{V_c(0) S}{S^2 + B^2} + \frac{I'(0-)}{C} \frac{1}{S^2 + B^2} \quad (\text{E. 61})$$

$$\downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow$$

$$L^{-1} = V_c(0-) \text{ Cos } Bt \qquad L^{-1} = \frac{I'(0-)}{C B} \text{ Sen } Bt$$

$$M = \frac{C_1}{S + jB} + \frac{C_2}{S - jB} + \frac{C_3}{S + j\omega} + \frac{C_4}{S - j\omega} \quad (\text{E. 62})$$

$$C_1 = \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{\omega \text{ Cos } \phi - j B \text{ Sen } \phi}{-2jB(-B^2 + \omega^2)} \right] \quad (\text{E. 63})$$

$$S = -jB$$

$$C_2 = \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{\omega \text{ Cos } \phi + j B \text{ Sen } \phi}{2jB(-B^2 + \omega^2)} \right] \quad (\text{E. 64})$$

$$S = jB$$

$$C_3 = \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{\omega \text{ Cos } \phi - j \omega \text{ Sen } \phi}{-2j\omega(-\omega^2 + B^2)} \right] \quad (\text{E. 65})$$

$$S = -j\omega$$

$$C_4 = \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{\omega \text{ Cos } \phi + j \omega \text{ Sen } \phi}{2j\omega(-\omega^2 + B^2)} \right] \quad (\text{E. 66})$$

Em (E.62), agrupando as  $L^{-1}$  de  $\frac{C_3}{S + j\omega}$  e  $\frac{C_4}{S - j\omega}$

resultam:  $C_3 e^{-j\omega t} + C_4 e^{j\omega t}$  (E.67)

com:

$$e^{j\phi} = \text{Cos } \phi + j \text{ Sen } \phi \quad (\text{E.68})$$

$$e^{-j\phi} = \text{Cos } \phi - j \text{ Sen } \phi \quad (\text{E.69})$$

em (E.67)

$$\begin{aligned} & \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{\omega \text{Cos } \phi + j \omega \text{ Sen } \phi}{2j\omega(\omega^2 - B^2)} \right] (\text{Cos } \omega t - j \text{ Sen } \omega t) + \\ & + \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{-\omega \text{Cos } \phi - j \omega \text{ Sen } \phi}{2j\omega(\omega^2 + B^2)} \right] (\text{Cos } \omega t - j \text{ Sen } \omega t) \quad (\text{E.70}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{1}{2j\omega(\omega^2 - B^2)} \right] [-2j\omega(\text{Cos } \phi \text{ Sen } \omega t + \\ & \text{Sen } \phi \text{ Cos } \omega t)] \quad (\text{E.71}) \end{aligned}$$

$$\frac{V_m}{L_L C} \left[ -\frac{\text{Sen } (\omega t + \phi)}{\omega^2 - B^2} \right] = -\frac{X_c}{X_L - X_c} \text{Sen } (\omega t + \phi) \quad (\text{E.72})$$

Em (E.62), as  $L^{-1}$  de  $\frac{C_1}{S + jB}$  e  $\frac{C_2}{S - jB}$

Resultam:  $C_1 e^{-jB} + C_2 e^{jB}$

Logo, em (E.71)

$$\frac{V_m}{L_L C} \left[ \frac{1}{2jB(\omega^2 - B^2)} \right] \left[ \left( -\omega \cos \phi + j B \sin \phi \right) \right. \\ \left. \left( \cos Bt - j \sin Bt \right) + \left( \omega \cos \phi - j B \sin \phi \right) \left( \cos Bt - \right. \right. \\ \left. \left. - j \sin Bt \right) \right] \quad (E.73)$$

Onde:

$$B = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad B = \omega \sqrt{\frac{X_{con}}{X_L}} \quad (E.74)$$

Finalmente:

$$V_c(t) = \frac{V_m X_c}{X_L - X_{con}} \left[ -\sin(\omega t + \phi) + \left( \frac{X_L}{X_{con}} \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right)^{1/2} \right. \\ \left. \cos(Bt - m) + V_c(0) \cos Bt + \sqrt{X_L X_{con}} I(0) \sin Bt \right] \quad (E.75)$$

onde:

$$m = \text{tg}^{-1} \left[ \sqrt{\frac{X_L}{X_{con}}} \text{ctg} \phi \right] \quad (E.76)$$

Observações:

- Com a expressão (E.76) é possível analisar outras diferentes situações de contingências no alimentador, assim pode-se analisar defeitos e chaveamento dos capacitores.

Anexo a este Apêndice E estão o programa de simulação da partida do motor de indução especificado no Apêndice D. O programa está baseado na modelagem feita no item E.2 e está codificado em linguagem FORTRAN.

Os resultados de transitórios da partida do motor de indução para casos específicos de compensação são mostrados nas Figs. E.4 e E.5.

Anexa-se também as simulações feitas no ATP para casos de curto circuitos no banco de capacitores e na carga. Vide as Figs. E.6 e E.7.

Finalmente estão as "plotagens" feitas no Laboratório da Partida de Motor de Indução. Esses resultados são mostrados nas Figs. E.8 e E.9.

```

C
C  PROGRAMA PARA SIMULAR A PARTIDA DO MOTOR DE INDUCAO QUANDO
C  E CONECTADO UM BANCO DE CAPACITORES SERIE NOS TERMINAIS
C
C
C  DEFINICAO DE VARIAVEIS
C
PROGRAM SERIECSAIDA6,SAIDA5,TAPE5=SAIDA5,TAPE6=SAIDA6)
DIMENSION I1(10000),IL(10000),IF(10000),VC(10000)
DIMENSION I11(10000),I12(10000),I(10000),X(10000),Y1(10000)
DIMENSION DERIVI(10000),INTI(10000)
REAL FI,RL,LL,CL,R1,L1,L2,LM,R2,VM,X,Y1
REAL BETA,ALFA,LAMBDA,GAMMA,DENO
REAL OMEGA,DENO1,TP,TS,TETA,E,E1,EX1
REAL A1,A2,A3,X1,AA,BB,I11,I12,I,X2,X3,D
REAL Q,R,SS,S1,T,INTE,TI,J,MODDER,MODINT,LLINHA
INTEGER K,MM,NP,NC,KK
COMPLEX*16 S,CON1,CON2,CONC5),CONS,I1,IL,IF,VC1,VC2,VC3
COMPLEX*16 C1,C2,C3,C4,C5,CMLX,CC1,CC2,CC3,CC4,VC
COMPLEX*16 PP1,PP2,PP3,PP4,PP5,PP6,PP7,DERIVI,INTI
COMMON GAMMA,LAMBDA,OMEGA,FI,AA,BB,DENO1,X1,K,X2,X3,D
C
C  INICIALIZACAO DE VARIAVEIS
C
VM=378./1.73
RL=2.60
LL=.01228
WRITE(*,*)( 'O VALOR DO CAPACITOR. .?')
READ(*,*) CL
WRITE(*,*)( 'O VALOR DA DESFASAGEM. .?')
READ(*,*) FI
R1=2.16
L1=.0057559
L2=.0059416
LM1=.1
R2=2.23
TP=2.50
INTE=.001

```

```

WRITE(*,*)( 'TEMPO DE SIMULACAO      ')
READ(*,*) TS
KK=1
C
C  CALCULOS PARCIAIS
C
LLINHA=L1+(LM1*L2)/(LM1+L2)
ALFA=RL+R1
C
WRITE(6,*)( '      TEMPO [ S ]              CORRENTE [ A ]')
DO 15 TI=0.00,TS,INTE
LM=LM1-(1-(TI/TP))*(LM1-LLINHA)
BETA=LL+L1+LM
LAMBDA=L2+LM
DENO=BETA*LAMBDA-LM**2
OMEGA=377.
DENO1=VM*OMEGA/(DENO)
S=CMPLX(0.,0.)
E=1-TI/TP
E1=1-TS/TP
IF(E.LE.E1) E=1E-7
GAMMA=R2/E
A1=(ALFA*LAMBDA+BETA*GAMMA)/DENO
A2=(GAMMA*CL*ALFA+LAMBDA)/(DENO*CL)
A3=GAMMA/(DENO*CL)
C
Q=(3*A2-A1**2)/9
R=(9*A1*A2-27*A3-2*A1**3)/54.
D=Q**3+R**2
IF(D.LE.0.) THEN
TETA =ACOS (-R/(SQRT(-Q**3)))
X1=2*SQRT(-Q)*COS(TETA/3)
X2=2*SQRT(-Q)*COS(TETA/3+2.094395)
X3=2*SQRT(-Q)*COS(TETA/3+4.188790)
ELSE
C
SS=SQRT(D)
S1=(ABS(R+SS))**0.333333

```

```

IF((R+SS).LE.0.) S1=-S1
T=(ABS(R-SS))*0.333333
IF((R-SS).LE.0.) T=-T

```

C

```

X1=S1+T-A1/3.
AA=-(S1+T)/2-A1/3.
BB=(S1-T)*1.73/2.
END IF

```

C

```

S=CMPLX(0,OMEGA)
K=1
CALL CALCCS,CONS)
C1=CONS
S=CMPLX(0,-OMEGA)
K=2
CALL CALCCS,CONS)
C2=CONS
S=CMPLX(X1,0.)
K=3
CALL CALCCS,CONS)
C3=CONS
IF(D.LE.0.) THEN
S=CMPLX(X2,0.)
ELSE
S=CMPLX(AA,BB)
END IF
K=4
CALL CALCCS,CONS)
C4=CONS
IF(D.LE.0) THEN
S=CMPLX(X3,0.)
ELSE
S=CMPLX(AA,-BB)
END IF
K=5
CALL CALCCS,CONS)
C5=CONS
CC1=C1+C2

```

```

CC2=C1-C2
IF (D.LE.O.) THEN
PP1=CC1*COS(OMEGA*TI)
PP2=CC2*CMPLX(O,-1.)*SIN(OMEGA*TI)
IF(X1.LE.-1E10) X1=-1E10
EX1=EXP(FLOAT(C1/10.E7)*FIX(10.**7*X1*TI))
PP3=C3*EX1
IF(AA.LE.-1E10) THEN
AA=-1E10
PP4=(O.,O.)
PP6=(O.,O.)
ELSE
PP6=CC4*CMPLX(O,1)*EXP(AA*TI)
PP4=CC3*EXP(AA*TI)
END IF
PP5=COS(BB*TI)
PP7=SIN(BB*TI)
I1(TI)=PP1+PP2+PP3+
C4*EXP(X2*TI)+C5*EXP(X3*TI)
IL(TI)=C3*EXP(X1*TI)+C4*EXP(X2*TI)+C5*EXP(X3*TI)
IF(TI)=CC1*COS(OMEGA*TI)-CC2*SIN(OMEGA*TI)*CMPLX(O,1)
C I(TI)=CABS(I1(TI))
C I11(TI)=CABS(IL(TI))
C I12(TI)=CABS(IF(TI))
ELSE
CC3=C4+C5
CC4=C4-C5
PP1=CC1*COS(OMEGA*TI)
PP2=CC2*CMPLX(O,-1.)*SIN(OMEGA*TI)
IF(X1.LE.-1E10) X1=-1E10
EX1=EXP(FLOAT(C1/10.E7)*FIX(10.**7*X1*TI))
PP3=C3*EX1
IF(AA.LE.-1E10) THEN
AA=-1E10
PP4=(O.,O.)
PP6=(O.,O.)
ELSE
PP4=CC3*EXP(AA*TI)

```

```

PP6=CC4*CMLPX(0,1)*EXPC(AA*TI)
END IF
PP5=COSC(BB*TI)
PP7=SINC(BB*TI)
I1(TI)=PP1+PP2+PP3+PP4*PP5-PP6*PP7
IL(TI)=C3*EX1
IF(TI)=CC1*COSC(OMEGA*TI)-CC2*SINC(OMEGA*TI)*CMLPX(0,1)
+PP4*COSC(BB*TI)-PP6*
SINC(BB*TI)
C I(TI)=CABS(I1(TI))
C I11(TI)=CABS(IL(TI))
C I12(TI)=CABS(IF(TI))
END IF
C
C CALCULO DA DERIVADA E INTEGRAL DA CORRENTE
C
IF(D.LE.0) THEN
DERIV(TI)=-C(C1+C2)*OMEGA*SINC(OMEGA*TI)-CMLPX(0,1)*C(C1-C2)*
OMEGA*COSC(OMEGA*TI)+X1*EX1*C3+C4*X2*EXPC(X2*TI)+C5*
X3*EXPC(X3*TI)
INTI(TI)=(C(C1+C2)/OMEGA)*SINC(OMEGA*TI)+CMLPX(0,1)*C(C1-C2)/
OMEGA*COSC(OMEGA*TI)+C3/X1*EX1+C4/X2*EXPC(TI*X2)+C5*
EXPC(X3*TI)/X3
ELSE
DERIV(TI)=-OMEGA*CC1*SINC(OMEGA*TI)-CMLPX(0,1)*CC2*OMEGA*
COSC(OMEGA*TI)+C3*X1*EX1+PP4*(AA*COSC(BB*TI)-BB*
SINC(BB*TI))-PP6*(AA*SINC(BB*TI)+BB
*COSC(BB*TI))
C
INTI(TI)=(CC1/OMEGA)*SINC(OMEGA*TI)+CMLPX(0,1)*C(CC2/OMEGA)
*COSC(OMEGA*TI)+C3*(EX1/X1)+PP4*(C(AA*COSC(BB*TI)
+BB*SINC(BB*TI))/(AA**2+BB**2))-PP6*
(CA*SINC(BB*TI)-BB*COSC(BB*TI))/(AA**2+BB**2)
VC1=VM*SINC(OMEGA*TI+FI)
VC2=-RL*I1(TI)
VC3=-LL*DERIV(TI)
VCC(K)=VM*SINC(OMEGA*TI+FI)-RL*I1(TI)-LL*DERIV(TI)
-(1/CL)*INTI(TI)

```

```

END IF
X(KK)=TI
C  Y1(KK)=I1(TI)
Y1(KK)=VC(KK)
WRITE(6,*) X(KK),C'          ',Y1(KK)
KK=KK+1
CONTINUE
NP=INT(TS/INTE)
NC=1
WRITE(5) NP,NC
DO 10  JI=1,NP
WRITE(5) X(JI),Y1(JI)
WRITE(*,*) X(JI),Y1(JI)
CONTINUE
WRITE(6,*)( 'COND = '),CL
WRITE(6,*)( 'TEMPO DE SIMUL. = '),TS
WRITE(6,*)( 'DESFASAGEM = '),FI
STOP
END

C
C  SUBROUTINE CALC
C
SUBROUTINE CALCC(S,CONS)
DIMENSION CON(5)
INTEGER K
COMPLEX*16 S,CON1,CON2,CON,CONS
COMPLEX*16 C1,C2,C3,C4,C5,OMSEN
REAL FI,LAMBDA,AA,BB,X1,OMEGA
COMMON GAMMA,LAMBDA,OMEGA,FI,AA,BB,DENO1,X1,K,X2,X3,D
C
OMSEN=CMPLX(OMEGA*SIN(FI),0.)
CON1=S*COS(FI)-OMSEN
CON2=LAMBDA*S+GAMMA
CON(1)=S-CMPLX(0,OMEGA)
CON(2)=S-CMPLX(0,-OMEGA)
CON(3)=S-CMPLX(X1,0)
CON(4)=S-CMPLX(AA,BB)
CON(5)=S-CMPLX(AA,-BB)

```

```
IF (D.LE.0) THEN
CONC4)=S-CMPLX(X2,0.)
CONC5)=S-CMPLX(X3,0.)
END IF
DO 20 I=1,5
IF(K.EQ.I) CONC I)=CMPLX(1.,0.)
CONTINUE
CONS=(DENO1 *CON1 *CON2)/(CONC1)*CONC2)*CONC3)*CONC4)*CONC5)
RETURN
END
```

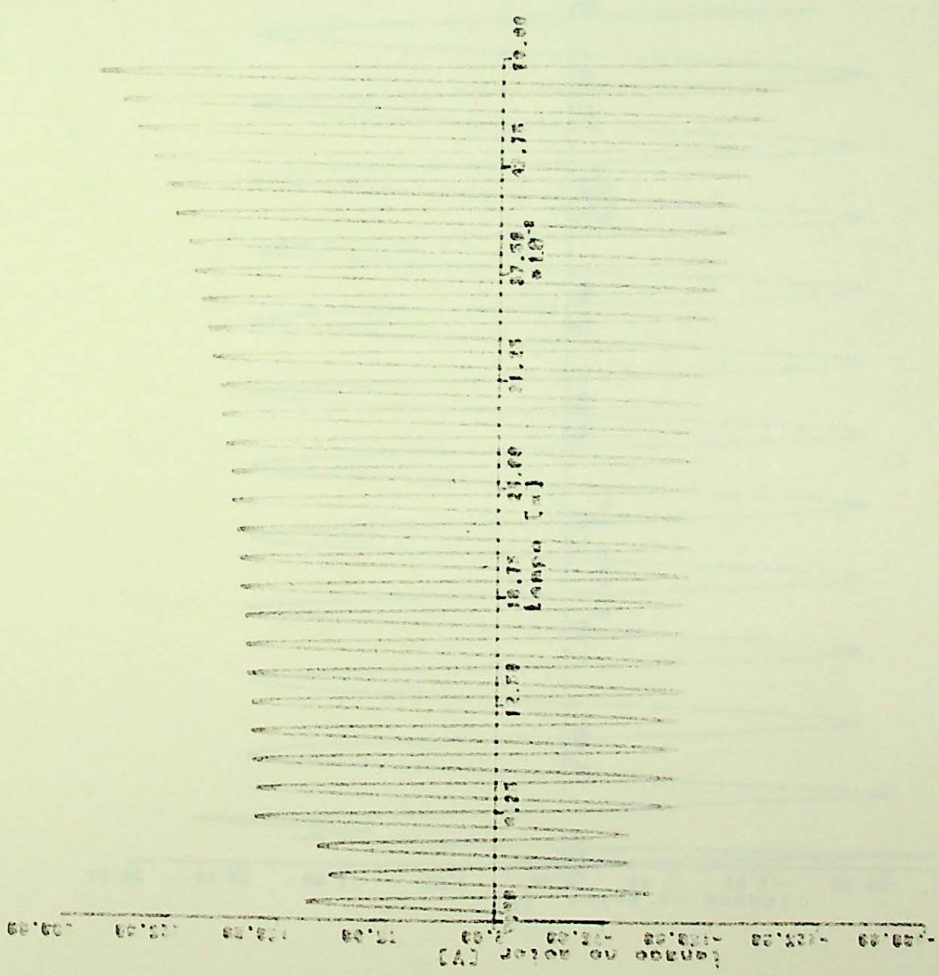


Fig. E.4 - Transiente da Partida do Motor de Indução para  $C = 100[\mu F]$   
(Simulada com o programa anexo)

PARTIDA DO MIT COM COND. SERIE  
MIT 1 KW - 3.8 A  
----- ENSAIO COM C = 30 MF

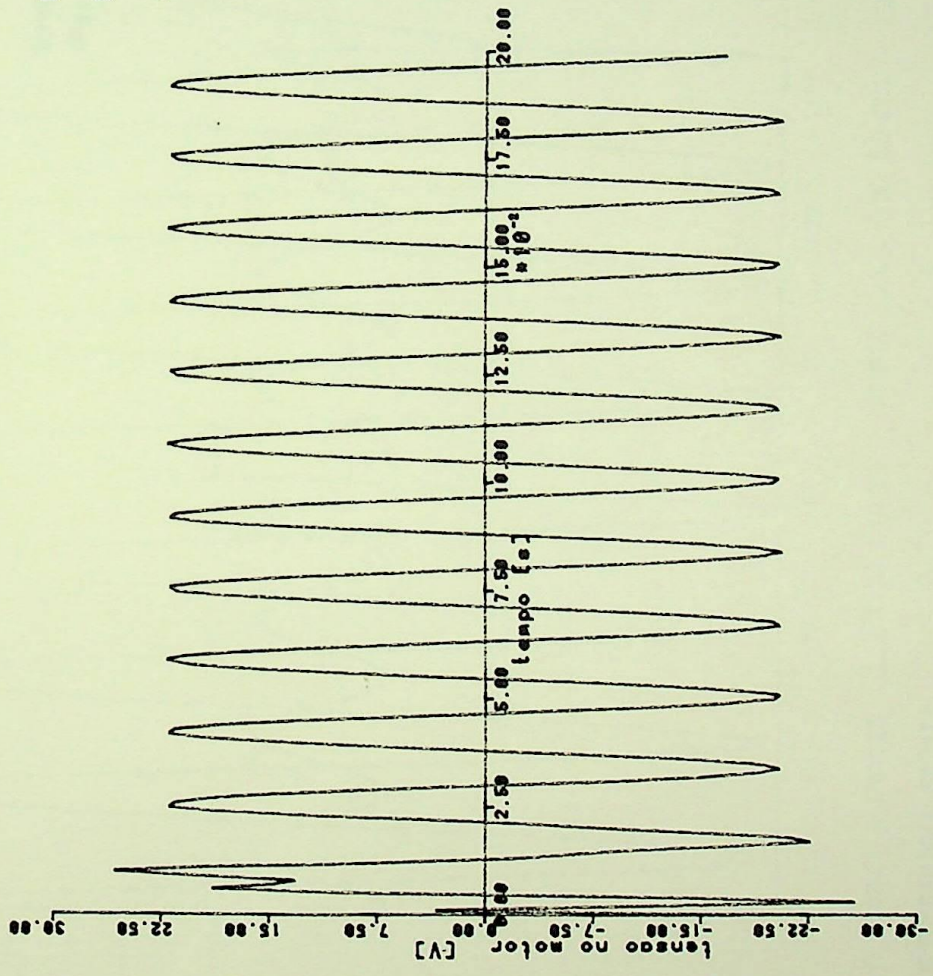


Fig. E.5 - Transitório da Partida do Motor de Indução para C = 30  $\mu$ F  
(Simulada com o programa anexo)

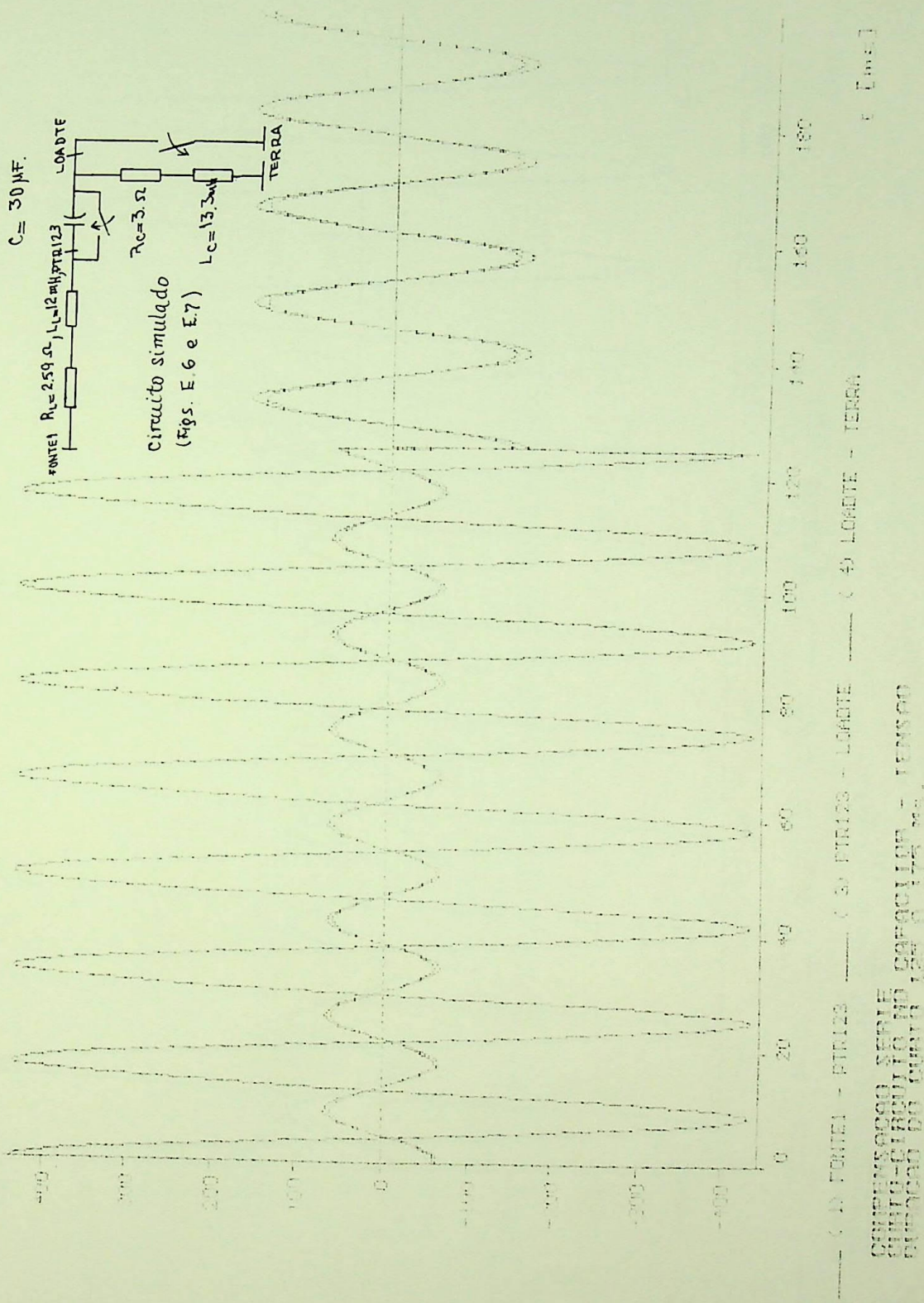


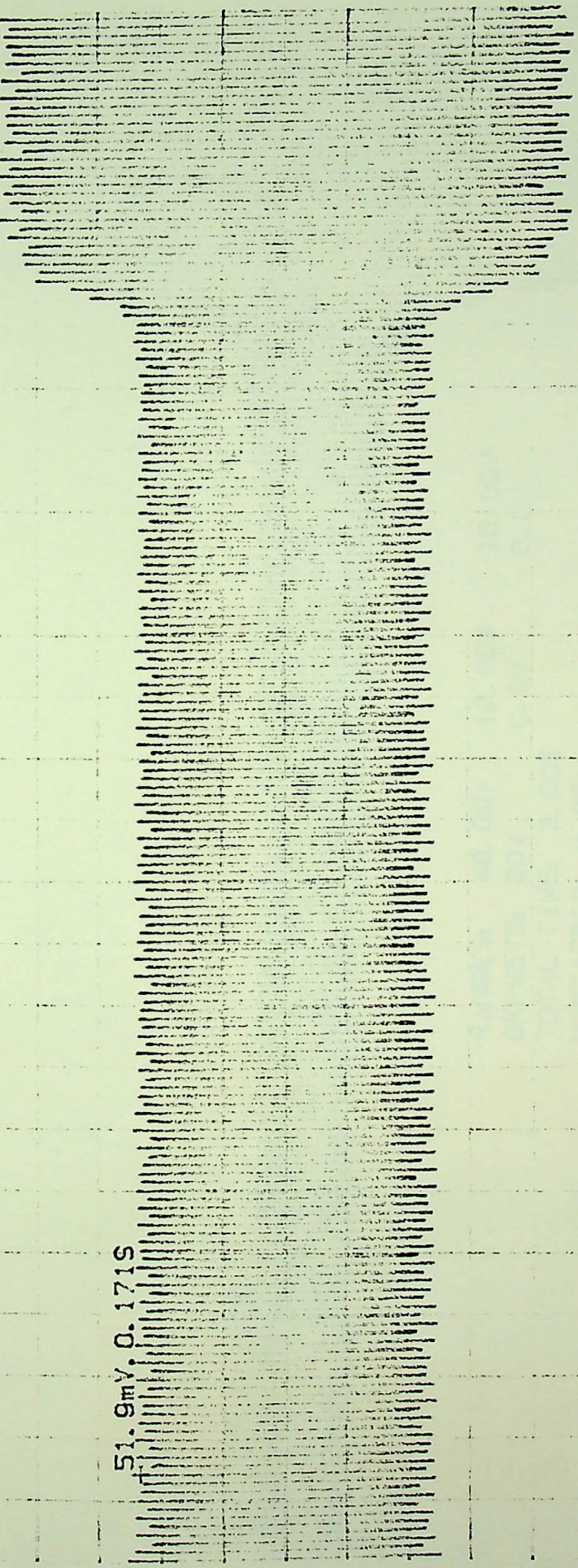
Fig. E.6 - Transiente do Curto-Circuito no Banco de Capacitores (Simulação Feita no ATP - Tensão).



Fig. E.7 - Transi rio do Curto-Circuito na Carga  
(Simula o Feita no ATP - Tens o).

102mV. 2.60ZS

51.9mV. 0.171S



RANGES: 400.0mV 10.00V 10.00V  
 OFFSETS: 0.20V 0.0V 0.0V  
 TOTAL TIME: 3.00S  
 POST-TRIG: 0.0S  
 TRIGGER: 0.0V 0.02V OUTSIDE

Fig. E.8 - "Plotagem" da Partida do Motor de Indução (corrente), para C = 40µF.

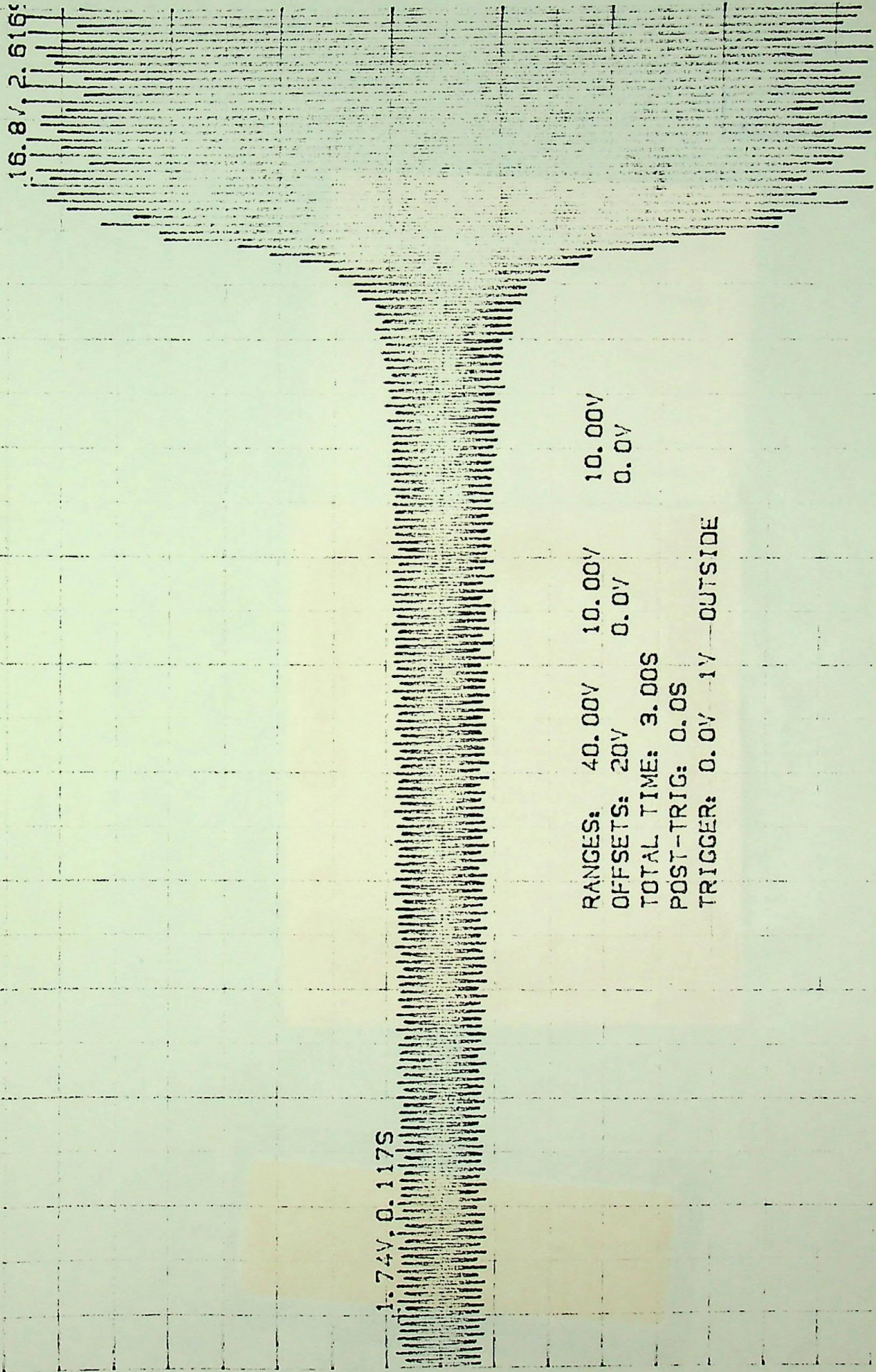


Fig. E.9 - "Plotagem" da Partida do Motor de Indução (tensão), para C = 40µF.

DATA 31/01/1994  
 PROC. \_\_\_\_\_  
 PED. PPG  
 LIV. \_\_\_\_\_  
 Cz\$ DOACAD

FICHA 01 T. 737  
 FICHA 01 T. 737  
 EFEI / Biblioteca Mauá  
 C957c  
 621.315:621.319.44(043.2)  
 CRUZ SANCHEZ, W. D.  
 Compensação série em sistemas  
 elétricos de distribuição.

Data	N.º Registro	Data
		Devolu
	Lopes Batista 05	1.3.

**EFEI**  
**BIBLIOTECA MAUÁ**

Esta publicação deverá ser devolvida  
 dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação  
 em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ  
 8200737  
  
 NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA