ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
EFEI

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
M.A.A.
B.M.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BANCOS DE CAPACITORES NA PRESENÇA DE HARMÔNICOS

JOSÉ BATISTA SIQUEIRA FILHO

ORIENTADOR: JOÃO ROBERTO COGO

Itajubá, novembro de 1995

CLASS. 621.319.4:621.3.018.3(043.2)

CUTTER. 5618b

TOMBO. 811

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

24.4.97		
26/08/97		
16/02/98		
07.03.98		
25.3.98		
29.4.98		
25.9.98		
20.10.98		
03.12.98		
11.5.99		
03.3.2000		

Dedico este trabalho aos meus Pais, José Batista de Siqueira e Maria do Socorro da Silva Batista, com muito amor e carinho, a qual sempre me apoiaram em todos momentos.

A minha irmã Quitéria Maria de Siqueira Neta e ao meu irmão Alexandre da Silva Batista que sempre me deram muito força e alegria
nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Desejo, expressar a minha gratidão a todas pessoas que, direta ou indiretamente, tornaram possível esta obra.

"Estes agradecimentos são de enorme avalia e não tem como medir"

* Ao Prof. João Roberto Cogo, pela valiosa e excelente orientação, sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

* Ao amigo Roubério, que soube dar apoio em todos os momentos.
* A família do Nelson, minha segunda família...
* Aos meus amigos de luta Nelson, Ismael, Roberto, Eugênio, Luiz Octávio (PARÁ) e Pitta que deste o começo deram atenção e força.
* Aos amigos Evandro e João José (JJ) pela estima e amizade.
* Aos muitos amigos que aqui não citei.
* Aos funcionários da EFEI que sempre me atenderam com muita atenção.
* Aos amigos da GSI, pelo o apoio concebido.

"O homem que não domina sua mente, é um fraco."

JOSÉ BATISTA S. FILHO

Resumo da dissertação de mestrado apresentada a PPG/EFEI como parte dos requisitos necessários para o obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

BANCOS DE CAPACITORES NA PRESENÇA DE HARMÔNICOS

José Batista Siqueira Filho

1995

Orientador: João Roberto Cogo
Departamento: Engenharia Elétrica

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

RESUMO

Devido a elevação do fator de potência de referência de 0,85 para 0,92, pela portaria 85 de 25 de Março de 1992, que foi revogada pela portaria 613 de 9 de Junho de 1993, que por conseguinte foi revogada pela atual portaria 1569 de 23 de dezembro de 1993, elaboradas pelo DNAEE- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, as indústrias terão que ajustar-se a esta nova situação, caso contrário incidirão multas. Assim, desenvolveu-se uma dissertação a respeito dos problemas e soluções decorrentes das instalações de bancos de capacitores.

Além da conceituação básica sobre o fator de potência apresentam-se os assuntos que envolvem os capacitores, tais como: fabricação e normas bem como efetua-se uma análise das cargas elétricas que desempenham uma função importante nos sistemas industriais, devido a utilização dos bancos de capacitores.

Apresenta-se ainda uma abordagem, esclarecendo os problemas inerentes aos tipos de conexões, a proteção e chaveamento de bancos de capacitores respectivamente. destacando as soluções adequadas e práticas que envolvem estas operações.

O objetivo da abordagem abrangente é fornecer, aos profissionais que trabalham na área de sistemas elétricos, uma base teórica para o entendimento adequado do assunto e apresentar uma metodologia referente à especificação básica de filtros de harmônicos.

Abstract of thesis presented to the PPG/EFEI as partial fulfillment of the requirements for the obtention of the degree of Master of Science (M.Sc.)

CAPACITOR BANKS IN THE PRESENCE OF HARMONICS

José Batista Siqueira Filho

1995

Chairman: João Roberto Cogo
Department: Electrical Engineering

ABSTRACT

Due to rise of the reference power factor from 0.85 to 0.92, through the enactment 85 from march 25, 1992, which was revoked by the enactment 613 from June 09, 1993, which furthermore was revoked by the enactment 1569 from December 23, 1993, elaborated by the DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia), industries will have to adjust themselves to this new situation, otherwise fines will apply. So, a dissertation has been developed about the problems and remedies the installation of capacitor banks gave rise.

Besides the basic conceptuation about the power factor subjects involving capacitors are presented such as: manufacture and standards as well as an analysis of electrical loads with an important role in the electrical systems is conducted due to the use of capacitor banks.

An approach which clarifies the problems inherent to the kinds connection, the protection and switching of banks, respectively, is presented enhancing suitable solutions and specification practices involving such operations.

The purpose of the approach is to the provide the professionals who work in the area of electrical systems with a theoretical basis for a suitable understanding of the subject and to present a methodology concerning a basic specification of harmonic filters.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - CAPACITORES 02

1. - Introdução 02
2. - Características Gerais 02
2.1 - Definição 02
2.2 - Capacitores de Potência 02
2.3 - Capacitância 02
2.4 - Constante Dielétrica Relativa 03
2.5 - Energia Armazenada 03
2.6 - Corrente no Capacitor 04
2.7 - Condições Especiais de Funcionamento 05
2.8 - Ligação dos Capacitores 06
2.9 - Absorção Dielétrica 06
2.10 - Circuito Equivalente 06
2.11 - Perdas Dielétricas 07
2.12 - Reatância Capacitiva 08
2.13 - Potência 08
3 - Características Construtivas 09
3.1 - Caixa 09
3.2 - Placa de Identificação 09
3.3 - Terminais 09
3.4 - Alças para Fixação 10
3.5 - Parte Ativa dos Capacitores 10
3.6 - Olhais de Levantamento 10
4 - Material Dielétrico 10
5 - Resistor de Descarga 13
6 - Características Elétricas 15
6.1 - Características de Longa Duração 15
6.2 - Características de Curta Duração 23
6.2.1 - Sobretensões de Curta Duração à Frequência Industrial 23
6.2.2 - Sobretensões Transitórias 24
6.2.3 - Sobrecorrente Transitória 24
7 - Capacitores com Fusível Externo 25
8 - Capacitores com Fusível Interno 28
9 - Ensaios 32
9.1 - Ensaios de Rotina 32
9.1.1 - Medição da Capacitância 32
9.1.2 - Medição da Tangente do Ângulo de Perdas 33

9.1.3 - Ensaio de Tensão Aplicada 34
9.1.3.1 - Ensaio de Tensão Aplicada Entre Terminais 34
9.1.3.2 - Ensaio de Tensão Aplicada Entre Terminais e Caixa 34
9.1.4 - Ensaio de Estanqueidade 34
9.1.5 - Ensaio do Dispositivo de Descarga 35
9.2 - Ensaios de Tipo 35
9.2.1 - Ensaio de Estabilidades Térmica 35
9.2.2 - Ensaio do Fator de Perdas a Temperatura Elevada 37
9.2.3 - Ensaio de Tensão Aplicada 37
9.2.4 - Ensaio de Impulso 37
9.2.5 - Ensaio de Descarga 38
9.2.6 - Ensaio de Tensão Residual 38
9.2.7 - Ensaio de Ionização 38
9.2.8 - Ensaios de Rádio-Ruído 39
9.2.9 - Ensaio de Regeneração 39
9.2.10 - Ensaio de Rigidez Dielétrica 39

CAPÍTULO II -POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA 41

1 - Introdução 41
2 - Sistemas Puramente Senoidais 41
2.1 - Potência Ativa 41
3 - Potência Aparente, Potência Reativa e Fator de Potência 47
4 - Sistemas Não-Senoidais 48
4.1 - Fonte de Tensão Senoidal em Regime Estacionário e Cargas com Harmônicos de Corrente 48
4.2 - Fonte de Tensão Possuindo Harmônicos e Cargas que Distorcem a Corrente em Regime Estacionário 51
4.3 - Cone de Potências 53
5 - Aspectos Gerais Sobre o Fator de Potência 54
5.1 - Objetivos do Alto Fator de Potência 56
5.2 - Capacitor Fixo 57
5.3 - Localização dos Capacitores 57
5.4 - Aplicações Específicas 59
6 - Regulamentação do Fator de Potência 59
6.1 - Portaria 85 60
6.2 - Portaria 613 62
6.3 - Portaria 1569 63
6.4 - Comentários Sobre as Portarias 64

7 - Correção do Fator de Potência 65
7.1 - Correção do Fator de Potência Junto a Motores de Indução 67

CAPÍTULO III - ANÁLISE DE CARGAS 70

1 - Introdução 70
2 - Carga Elétrica Versus Fator de Potência 70
2.1 - Cargas Normais 70
2.2 - Cargas Especiais 72
3 - Interferência da Eletrônica de Potência no Fator de Potência . 76
4 - Os Harmônicos Presentes em Cargas Elétricas Especiais 79
4.1 - Cargas com Alta Intensidade de Harmônicos 80
4.1.1 - Conversores Estáticos de Potência 81
4.1.2 - Compensadores Estáticos 85
4.1.3 - Transformadores 86
4.1.4 - Motores de Indução 87
4.1.5 - Fornos a Arco Elétrico 88
4.1.6 - Iluminação Fluorescente 89
5 - Efeitos dos Harmônicos 90
6 - Recomendações 91
6.1 - Recomendação do IEEE Std 519-1992 91
6.2 - Recomendação Brasileira 92
6.2.1 - Responsabilidade 93
6.2.2 - Responsabilidades das Partes Envolvidas 93
6.2.3 - Limites 94

CAPÍTULO IV - CONEXÕES DOS BANCOS DE CAPACITORES 98

1 - Introdução 98
2 - Fatores que Envolvem as Conexões 101
2.1 - Fusível 101
2.2 - Nível de Isolamento 104
2.3 - Harmônicos e Interferência Indutiva 104
2.4 - Tensões Anormais 105
2.5 - Proteção Contra Frente-de-Onda 108
2.6 - Conexão do Sistema (Aterrado ou Não) 108
3 - Vantagens e Desvantagens das Conexões 109
3.1 - Conexão Triângulo (Delta) 111
3.2 - Estrela com Neutro-Aterrado 112
3.3 - Banco em Estrela-Isolado 112
3.4 - Banco em Dupla-Estrela-Isolada 113

3.5 - Conexão Dupla-Estrela-Aterrada 113
4 - Sobretensões Devido a Perdas de Unidades Capacitivas..... 114
4.1 - Triângulo ou Estrela-Aterrada..... 116
4.2 - Conexão em Estrela-Isolada..... 117
4.3 - Conexão em Dupla-Estrela-Isolada..... 118
4.4 - Conexão em Dupla-Estrela-Aterrada..... 119
5 - Conexões em Baixa Tensão (≤1000 [V]) 119
6 - Conexão em Alta Tensão (>1000 [V]) 119

CAPÍTULO V - PROTEÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES..... 122

1 - Introdução..... 122
2 - Fusível..... 123
2.1 - Considerações..... 123
2.2 - Tipos de Fusíveis 132
2.2.1 - Fusíveis para Baixa Tensão (ATÉ 1000 [V])..... 132
2.2.2 - Fusíveis para Alta Tensão (SUPERIOR A 1000 [V]) 132
2.2.3 - Os fusíveis de Expulsão 132
2.2.4 - Fusíveis do Tipo Limitadores de Corrente..... 138
2.2.5 - Fusíveis Internos..... 140
2.3 - Fusíveis de Grupo 141
3 - Relés..... 141
3.1 - Utilização dos Relés 142
3.2 - Proteção por Relés de Sobrecorrente..... 142
3.3 - Proteção dos Capacitores por Réle de Desequilíbrio 142
4 - Relés Térmicos 144
5 - Pára-Raios para Proteção de Banco de Capacitores..... 144
6 - Esquemas de Proteção dos Bancos de Capacitores 145
7 - Recomendação..... 150

CAPÍTULO VI - CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES 152

1 - Introdução..... 152
2 - Transitórios Causados pela Energização de Banco de Capacitores..... 152
2.2 - Energização de Bancos de Capacitores em Paralelo 158
3 - Transitórios Causados pela Desenergização de Bancos de Capacitores..... 160
4 - Método da Redução das Correntes de "INRUSH" 164
5 - Energização de Transformadores Próximo a Banco de Capacitores..... 166

Escola Politécnica de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
BIM

5.1 - Curva de Saturação dos Transformadores 166
5.2 - Corrente de Energização de um Transformador ("inrush")... 169
5.3 - Energização de Transformadores Próximos a Banco de Capacitores 169
6 - Fenômeno da Auto-Excitação 174
7 - Equipamentos de Manobra de Bancos de Capacitores..... 177
7.1 - Bancos em Baixa Tensão (menor que 1000 [V]) 177
7.2 - Banco de Capacitores em Média e Alta Tensão..... 179
7 - Recomendação..... 181

CAPÍTULO VII - FILTROS DE HARMÔNICOS 185

1 - Introdução..... 185
2 - Filtros 185
3 - Classificação dos Filtros 186
4 - Ressonância Devido aos Harmônicos..... 191
5 - Efeito da Impedância do Sistema 195
5.1 - Comportamento da Impedância do Sistema Devido a Instalação de Banco de Capacitores 197
5.2 - Comportamento da Impedância do Sistema Devido a Instalação de Filtros..... 199
6 - Filtros para Correção do Fator de Potência 202
7 - Projeto de um Filtro Visando a Correção do Fator de Potência 203
7.1 - Roteiro para Correção do Fator de Potência..... 204
7.1.1 - Especificação..... 207
7.2 - Fluxograma..... 208
7.3 - Equacionamento para Correção do Fator de Potência na Presença de CEE (Cargas Elétricas Especiais)..... 208
7.4 - Exemplo de Aplicação da Correção do Fator de Potência na Presença de Cargas Elétricas Especiais..... 214
8 - Projeto Básico de Filtro para Absorção de Harmônicos de Corrente 219
8.1 - Procedimento a Determinação do Filtro de Harmônico de Corrente..... 225
8.2 - Procedimento para Calcular Filtros de Harmônico de Corrente..... 227
8.3 - Fluxograma..... 229
8.4 - Exemplo de Cálculo de Filtro de Harmônicos de Corrente 231
9 - Conclusão..... 239

CAPÍTULO VIII- CONCLUSÕES **240**

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA **244**

ANEXOS **251**

SIMBOLOGIA

A - Área;
C_1 - Capacitância a ser observada cujo dielétrico é o material a ser estudado;
C_0 - Capacitância cujo dielétrico é o vácuo;
C_{EQ} - Capacitância equivalente;
C_j - Capacitância individual de cada unidade capacitiva, (j=1,2,3,...N);
C - Capacitância do capacitor;
C_A, C_B, C_C - Capacitância medida entre os terminais de linha de um capacitor
C_N - Capacitância nominal;
$\cos\varphi_1$ - Fator de deslocamento;
$\Delta\tau$ - Elevação de temperatura;
α - Ângulo de disparo;
φ_1 - Ângulo de deslocamento do componente fundamental da corrente em relação à componente fundamental de tensão;
φ_{in} - Ângulo de fase do harmônico de corrente de ordem n no instante t=0;
φ_n - Ângulo de deslocamento do fasor de corrente para um harmônico de ordem n;
φ_N - Ângulo de deslocamento nominal;
φ_{u1} - Ângulo de deslocamento do fasor de tensão na frequência fundamental;
φ_{un} - Ângulo de fase do harmônico de tensão de ordem n no instante t=0;
ϕ - Valor instantâneo do fluxo;
φ_{i1} - Ângulo de deslocamento do fasor corrente na frequência fundamental;
μ - Permeabilidade magnética;
d - Espaço que separa os eletrodos;
DA - Demanda de potência ativa faturável;
DAI - Demanda de potência ativa, verificada por posto apropriado, no intervalo de integralização, de 1 (uma) hora, nos postos tarifários (p), durante o período de faturamento;
DAM- Demanda de potência ativa máxima faturável;
dt - Período de tempo durante em que a tensão sofreu variação,
du - Variação da tensão;
E - Energia armazenada em um capacitor ou grupo de capacitores;
e - Força eletromotriz induzida no circuito;
ε - Permissividade dielétrica do material;
f - Frequência da tensão aplicada no capacitor;

f_1 - Frequência nominal do sistema;
F_{di} - Fator de distorção da corrente;
FDR - Faturamento de demanda de energia;
FER - Faturamento de energia reativa;
$f_{MÁX}$ - Frequência máxima de oscilação da corrente na energização do banco de capacitores;
f_{MM} - Valor instantâneo da força magnetomotriz;
f_n - Frequência de ressonância;
f_N - Frequência natural;
FP - Fator de potência;
FP_1 - Fator de potência atual da instalação;
FP_2 - Fator de potência desejável para a instalação;
Fpr - Fator de potência de referência;
I - Valor eficaz da corrente;
i - Valor instantâneo da corrente;
I_1 - Valor eficaz da corrente do circuito na frequência fundamental;
i(t) - Valor instantâneo da corrente do circuito;
I_0 - Corrente a vazio do motor;
I_{AT} - Corrente de ajuste da unidade térmica;
I_C - Corrente no capacitor ou banco de capacitores;
Icc - Corrente de curto-circuito;
I_{CH} - Corrente mínima da chave;
I_{Cn} - Corrente absorvida pelo banco de capacitores para um harmônico de ordem n;
I_{CO} - Corrente mínima do contator;
Id - Corrente de carga no lado cc da ponte conversora;
I_{DES} - Corrente de descarga do pára-raios;
I_F - Fator de multiplicação da corrente nominal do capacitor.
If_a, If_b - Corrente nas fases a e b no momento da falta.
I_{FC} - Corrente de falta no capacitor;
I_L - Demanda máxima de corrente da carga para o PAC;
$I_{MÁX}$ - Valor máximo da corrente;
I_{MF} - Corrente que circula na meia fase do banco;
I_N - Corrente nominal;
I_n - Valor eficaz do harmônico de corrente;
i_q - Corrente responsável pelo fluxo magnético.
I_{RMS} - Valor eficaz da corrente;
I_{SC} - Corrente de curto-circuito do PAC;
I_{Sn} - Corrente absorvida pelo o sistema para um harmônico de ordem n;
I_T - Corrente fase-terra;
K - Constante dielétrica do material;
k_τ - Constante de proporcionalidade (válida para regime permanente);
L - Indutância própria da bobina;
l - Comprimento do circuito magnético;
M - Número normal de capacitores em paralelo por grupo;
MÁX- Função que indentifica o maior valor de demanda de potência ativa;
$\overline{M}_K$ - Relação entre os conjugados máximo e nominal do motor;

N - Número de espiras do condutor no circuito;
n - Ordem do harmônico;
N_{CE} - Número de unidades capacitivas eliminadas de um único grupo série;
N_{CP} - Número de capacitores paralelo em cada grupo série;
N_{GS} - Número de grupos série por fase;
N_{MCP} - Número mínimo de capacitores em paralelo em cada grupo série por fase;
n_S - Harmônico que provocará ressonância no sistema;
p - Horário de ponta ou fora de ponta, ou ainda o período de faturamento;
P - Potência ativa;
PAC - Ponto de acoplamento entre o consumidor e a concessionária de energia;
P_e - Perdas no condutor;
P_N - Potência nominal do banco de capacitores;
Q_0 - Potência reativa para operação a vazio;
Q_1 - Potência reativa na frequência fundamental;
Q_E - Carga elétrica;
Q_N - Potência reativa nominal da unidade;
Q_n - Potência reativa devida aos harmônicos;
Q_{NBC} - Potência nominal do banco de capacitores a ser instalado;
Q_T - Potência reativa total do banco de capacitores;
R - Resistência elétrica do circuito;
R_G - Resistência do gerador;
R_M - Relutância do circuito magnético;
R_{MAG} - Relutância do circuito magnético do núcleo;
R_T - Resistência do transformador principal;
R_{TH} - Resistência equivalente de Thevenin;
R_{Tmn} - Resistência do transformador da CEE;
S_F - Potência aparente na frequência fundamental;
S_n - Potência aparente para um harmônico de ordem n;
S_{CC} - Potência de curto-circuito na barra na qual está conectado o banco de capacitores;
S_{KN} - Escorregamento correspondente ao conjugado máximo do motor;
S_L - Potência a ser liberado com a instalação de capacitores;
S_N - Escorregamento nominal do motor;
S_{TN} - Potência nominal do transformador;
T - Período (note que $wt = 2.\pi$);
TC - Transformador da ponte conversora;
TCA - Tarifa de consumo de potência ativa em conformidade com a legislação vigente;
TDA - Tarifa de demanda de potência ativa em conformidade com a legislação vigente;
TE - Transformador do sistema;
$T_{MÁX}$ - Temperatura máxima no dielétrico em pu da nominal;
U - Tensão aplicada;

Biblioteca MAUÁ BtM de Engenharia de Irajubá - EFEI

$u(t)$ - Valor instantâneo da tensão do circuito;
$u(t)_{MÁX}$ - Tensão máxima da fonte;
U_1 - Valor eficaz da tensão do circuito na frequência fundamental;
Uab, Ubc, Uca- Tensão fase-fase;
U_{BCN} - Tensão nominal do banco de capacitores.
U_C - Valor eficaz da diferença de potencial no capacitor;
$U_{C(0)}$ - Tensão inicial no capacitor;
U_E - Tensão de ensaio;
U_F - Valor eficaz da tensão na fonte;
U_{FF} - Tensão fase-fase do sistema.
U_{FN} - Tensão entre fases e neutro do sistema;
U_{GR} - Tensão nos grupos em série;
U_I - Tensão suportável de impulso do sistema (BIL);
U_L - Valor eficaz da diferença de potencial do indutor;
$U_{MÁX}$ - Tensão fase-neutro do sistema (valor de pico);
U_N - Tensão nominal;
U_n - Tensão individual para o harmônico de ordem n;
U_{RMS}- Valor eficaz da tensão;
U_{UR} - Tensão resultante nas unidades remanescentes do mesmo grupo com N_{CE} capacitores excluídos;
VU - Valor em pu da vida útil em relação às condições nominais;
w - $2\pi f$, frequência angular;
W_F - Perda máxima;
W_R - Perda real do capacitor de ensaio;
ξ - Relação entre a tensão nominal e a tensão na frequência fundamental do banco de capacitores;
X - Número de grupos em série por fase;
X_C - Reatância capacitiva na frequência f;
X_{C1} - Reatância capacitiva na frequência fundamental;
X_{Cn} - Reatância capacitiva para um harmônico de ordem n;
X_{Gn} - Reatância do gerador para um harmônico de ordem n;
X_L - Reatância indutiva;
X_m - Reatância de magnetização;
X_R - Reatância total indutiva de cada reator por fase;
X_{R1} - Reatância indutiva na frequência fundamental;
X_{S1} - Reatância na frequência fundamental;
X_{TCn} - Reatância indutiva do transformador da CEE para um harmônico de ordem n;
X_{TE} - Reatância do transformador;
X_{TEn} - Reatância indutiva do transformador do sistema para um harmônico de ordem n;
X_{TMn} - Reatância do transformador da CEE para um harmônico de ordem n;
X_{Tn} - Reatância do transformador principal para um harmônico de ordem n;
Z% - Impedância percentual do transformador;

CAPÍTULO I

CAPACITORES

CAPACITORES

DEFINIÇÕES BÁSICAS

1- INTRODUÇÃO

Apresentam-se neste capítulo as características gerais, construtivas e elétricas dos bancos de capacitores, bem como as normas e recomendações.

2- CARACTERÍSTICAS GERAIS

2.1- DEFINIÇÃO

Os capacitores são constituídos basicamente de duas placas paralelas, desde que, entre elas, exista um meio dielétrico qualquer.

2.2- CAPACITORES DE POTÊNCIA

Os capacitores de potência são equipamentos com o propósito de em um circuito elétrico compensar o fator de potência. São caracterizados por sua potência reativa nominal [kVAr], sendo fabricados em unidades monofásicas ou trifásicas, para alta e baixa tensão [46].

2.3- CAPACITÂNCIA

Capacitância é a propriedade pela qual qualquer sistema contendo um conjunto de dielétricos e condutores armazenam energia em seu campo elétrico, quando existe uma diferença de potencial entre os mesmos [1]. O valor da capacitância (capacidade de armazenamento) é dado pela equação (1).

$$C = \frac{Q_E}{U} \qquad (1)$$

onde:

- C - Capacitância do capacitor, em [F];
- U - Tensão aplicada entre as placas, em [V];
- Q_E - Carga elétrica, em [C].

Admitindo-se que os condutores, constituem-se por duas placas planas paralelas (ou eletrodos), a sua capacitância pode ser dada pela equação (2):

$$C = \frac{K.\varepsilon.A}{d.10^{-12}} \qquad (2)$$

onde:

C - Capacitância em [F];
A - Área dos eletrodos , em [m^2];
d - Espaço que separa os eletrodos, em [m];
K - Constante dielétrica do material (adimensional - vide equação (3));
ε - Permissividade dielétrica, $\varepsilon = 8{,}85.10^{-12}$, em [F/m].

2.4- CONSTANTE DIELÉTRICA

A constante dielétrica K de um material, define o comportamento do meio. Na prática a constante K é definida pela relação entre as capacitâncias de dois capacitores iguais, tendo um deles como dielétrico, o material a ser estudado e o outro o vácuo. A equação (3), apresenta a relação entre tais capacitâncias.

$$K = \frac{C_1}{C_0} \qquad (3)$$

onde:

C_0 - Capacitância cujo dielétrico é o vácuo;
C_1 - Capacitância a ser observada cujo dielétrico é o material a ser estudado.

Por definição, a constante dielétrica relativa do ar seco e puro é, aproximadamente 1,0006, enquanto que a maior parte dos materiais dielétricos sólidos e líquidos tem constantes dielétricas maiores que 2.

A tabela 1 mostra as constantes dielétricas de alguns materiais.

VALORES VÁLIDOS A 25° E NA FAIXA DE 60 [Hz] A 1 [MHz]	
AR (PURO E SECO)	1,006
PAPEL PARAFINA	3,5 a 2,9
ÁGUA DESTILADA	81
PAPEL ENCERADO	3,1
VIDRO	5 a 10
ÓLEO DE TRANSFORMADORES	2,5
VASELINA	2,16
FIBRA	6,5

TABELA 1 - CONSTANTES DIELÉTRICAS DE ALGUNS MATERIAIS

2.5- ENERGIA ARMAZENADA

Quando os eletrodos de um capacitor forem submetidos a uma diferença de potencial em corrente alternada ou no instante inicial da aplicação de uma fonte de corrente contínua, surge uma corrente entre as placas, proporcionando o

aparecimento de uma certa quantidade de energia que fica armazenada, no caso da tensão aplicada ser em corrente contínua, no campo elétrico. A energia armazenada pode ser dada pela equação (4):

$$E = \frac{1}{2}.C.U_{MÁX}^2 \qquad (4)$$

onde:

$U_{MÁX}$ - Tensão aplicada (valor de pico), em [V].

2.6- CORRENTE NO CAPACITOR

A corrente no capacitor é diretamente proporcional à tensão e inversamente proporcional ao tempo. Para uma determinada variação da tensão du em um período de tempo dt, a corrente i pode ser dada pela equação (5).

$$i = C.\frac{du}{dt} \qquad (5)$$

onde:

du - Variação da tensão, em [V];
dt - Período de tempo durante em que a tensão sofreu variação, em [s].

Conforme a equação (5), considerando-se o capacitor desenergizado e aplicando uma tensão de valor U ao mesmo, a corrente é de valor elevado no capacitor no momento de sua energização, já que a tensão irá variar desde um valor zero até o valor máximo da tensão aplicada para um curto intervalo de tempo. A figura 1 mostra o circuito utilizado para simular em computador esta situação e a figura 2 mostra o resultado da simulação. No anexo 1 encontra-se o diagrama de impedâncias e arquivo de dados utilizado para efetuar a simulação.

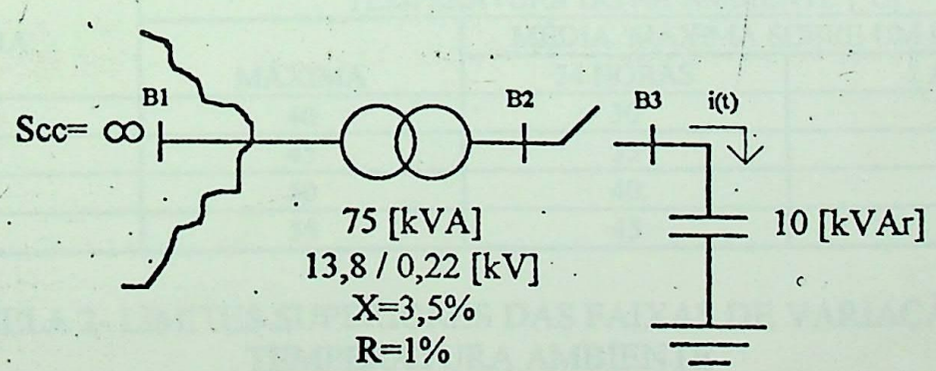
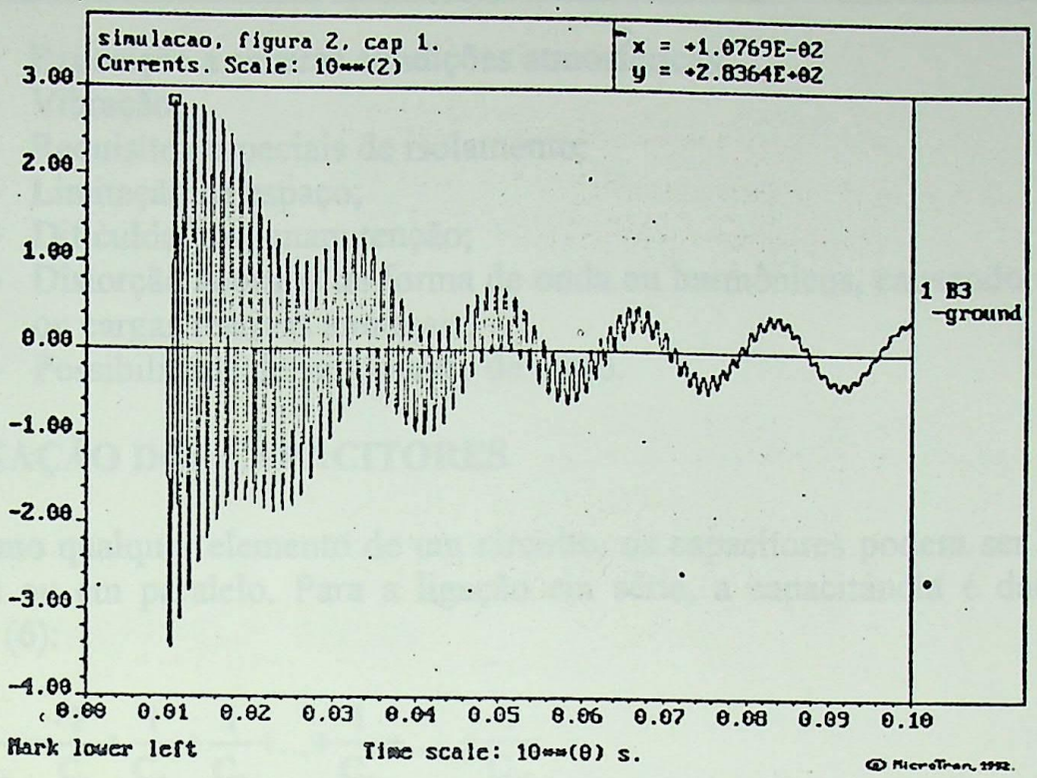


FIGURA 1- CIRCUITO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO

OBSERVAÇÃO: Todas as simulações efetuadas possuem o correspondente diagrama de impedância e arquivos de dados utilizados, nos anexos no final deste trabalho. Os resultados gráficos das simulações estão em valores de pico.



Biblioteca

FIGURA 2- RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO ESQUEMA DA FIGURA 1

2.7- CONDIÇÕES ESPECIAIS DE FUNCIONAMENTO

Quando as unidades capacitivas são, conforme os fabricantes, destinadas a serem utilizadas nas condições a seguir, podem deteriorar os capacitores em um curto intervalo de tempo, são elas:

a - Altitudes superiores a 1000 [m];
b - Temperaturas que excedam os valores especificados na tabela 2;

LETRA	TEMPERATURA DO AR AMBIENTE [°C]		
	MÁXIMA	MÉDIA MÁXIMA SOBRE UM PERÍODO	
		24 HORAS	1 ANO
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

TABELA 2- LIMITES SUPERIORES DAS FAIXAS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE

onde:

A, B, C, D - Representam as temperaturas ambiente máximas para a unidade capacitiva.

c - Atmosfera corrosiva, como por exemplo, em áreas industriais, em ambientes excessivamente salinos, etc;
d - Umidade relativa elevada;
e - Ambientes excessivamente poluídos;

f - Exposição a severas condições atmosféricas;
g - Vibração;
h - Requisitos especiais de isolamento;
i - Limitação de espaço;
j - Dificuldade de manutenção;
l - Distorção anormal da forma de onda ou harmônicos, causando tensões ou cargas reativas anormais;
m - Possibilidade de surgimento de mofo.

2.8- LIGAÇÃO DOS CAPACITORES

Como qualquer elemento de um circuito, os capacitores podem ser ligados em série ou em paralelo. Para a ligação em série, a capacitância é dada pela equação (6):

$$\frac{1}{C_{EQ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ... + \frac{1}{C_j} + ... + \frac{1}{C_N} \qquad (6)$$

Para a associação em paralelo, a capacitância pode ser dada pela equação (7):

$$C_{EQ} = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_j + ... + C_N \qquad (7)$$

onde:

C_{EQ} - Capacitância equivalente, em [F];
C_j - Capacitância individual de cada unidade capacitiva, (j=1,2,3,...N) em [F].

2.9- ABSORÇÃO DIELÉTRICA

Absorção dielétrica é a absorção de carga elétrica por um dielétrico submetido a um campo elétrico, por efeitos distintos da polarização normal [2].

Esta carga não se escoa instantaneamente, quando um capacitor com um dielétrico é curto circuitado, e só o faz em um certo tempo de decaimento, que pode atingir alguns minutos. A absorção dielétrica é usualmente expressada em [V/mm]. É importante notar que o comportamento desta grandeza é raramente linear com a separação da distância entre os eletrodos.

2.10- CIRCUITO EQUIVALENTE

Todos os capacitores na prática nao possuem somente capacitância, mas apresentam também indutância e resistência. Um circuito equivalente na determinação das características de um capacitor, é mostrado na figura 3. Neste circuito, R_s é a resistência série presentes nos cabos de conexão, eletrodos e terminais de contato; R_p é a resistência "shunt" do material dielétrico

(representando as perdas correspondentes). A indutância dos eletrodos e terminais do capacitor é representada por L.

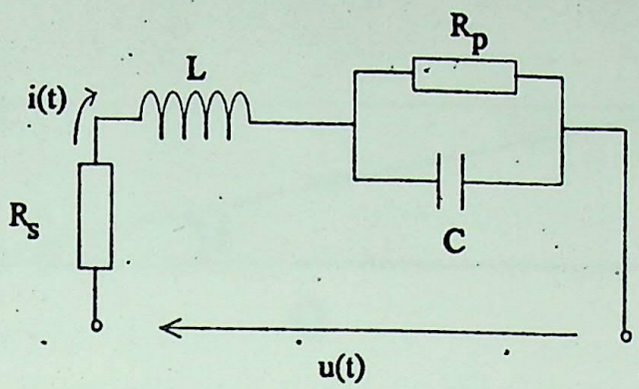


FIGURA 3 - CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLES DE UM CAPACITOR

2.11- PERDAS DIELÉTRICAS

É conhecido que um capacitor ideal sujeito a tensão alternada à frequência industrial, em condições ideais, isto é, sem apresentar distorções, a corrente através do mesmo estará adiantada da tensão de 90° elétricos. Na realidade, este ângulo é ligeiramente menor devido às perdas provocada pela resistência elétrica do material, que compõem o dielétrico, à dispersão superficial, aos efeitos dielétricos e às perdas nos eletrodos e terminais.

A figura 4 mostra o diagrama fasorial de tensão-corrente para um capacitor ideal e um capacitor real.

As perdas médias obtidas nas unidades capacitivas são:

→ Dielétrico de papel kraft: 2,2 [W/kVAr];
→ Dielétrico de kraft e filme: 1 [W/kVAr];
→ Dielétrico de filme: 0,6 [W/kVAr].

A relação das perdas do capacitor (Pw) e sua potência reativa (Q) correspondem à denominação de tangente do ângulo de perdas (tgδ), como mostra a figura 5.

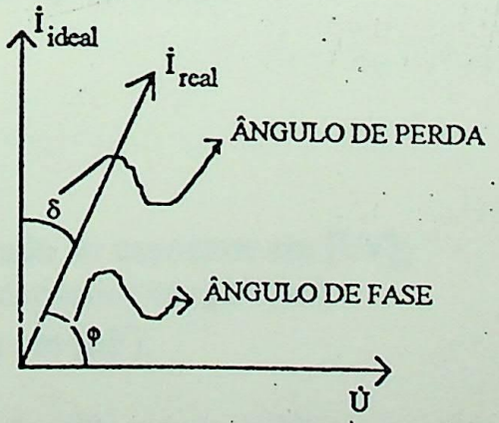


FIGURA 4 - DIAGRAMA FASORIAL MOSTRANDO AS CORRENTES IDEAL E REAL PARA UM CAPACITOR

note que:

$$\delta + \phi = 90^{\circ}$$

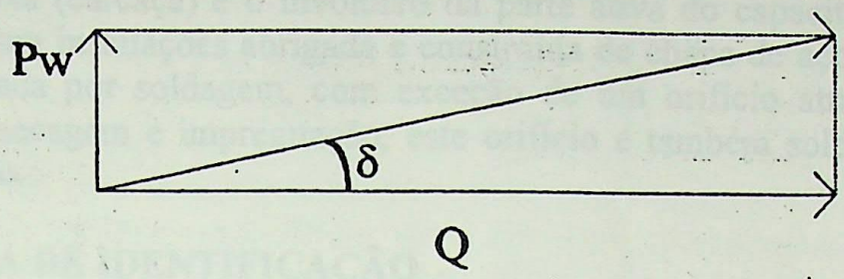


FIGURA 5 - GRÁFICO MOSTRANDO A RELAÇÃO DAS PERDAS (tg δ) DO CAPACITOR (Pw) E SUA POTÊNCIA REATIVA (Q)

onde:

$$tg\delta = \frac{Pw}{Q}$$

2.12- REATÂNCIA CAPACITIVA

A reatância capacitiva de um capacitor é dada pela a equação (8):

$$X_c = \frac{1}{2.\pi.f.C} \qquad (8)$$

onde:

- X_C - Reatância capacitiva na frequência f, em [ohms];
- f - Frequência da tensão aplicada no capacitor, em [Hz];
- C - Capacitância, em [F].

2.13- POTÊNCIA

A potência aparente quando um capacitor é submetido a uma tensão de valor U, pode ser dada pela equação (9):

$$Q = \frac{1}{1000} 2.\pi.f.C.U^2 \qquad (9)$$

onde:

- U - Tensão aplicada ao capacitor em [kV];
- Q - Potência do capacitor em [kVAr];
- C - Capacitância em [μF].

Observa-se na equação (9), que a potência reativa varia de acordo com o quadrado da tensão, logo quando um capacitor é submetido a uma tensão menor ou maior que a especificada, tem-se uma diminuição ou aumento de sua potência reativa variando com o quadrado da tensão, respectivamente.

3- CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

3.1- CAIXA

A caixa (carcaça) é o invólucro da parte ativa do capacitor. Basicamente são feitas para instalações abrigada e construída de chapa de aço galvanizado. A caixa é selada por soldagem, com exceção de um orifício através do qual se processa a secagem e impregnação, este orifício é também soldado no final da impregnação.

3.2- PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

É a parte do capacitor onde são colocados todos os dados característicos para sua identificação. As informações que devem constar na placa de identificação para capacitores com tensão acima de 1000 [V] [4], são:

* Nome do fabricante;
* Termo "*capacitor de potência em derivação*";
* Tipo ou marca;
* Número de série;
* Número de fabricação;
* Potência nominal em [kVAr];
* Tensão nominal em [V] ou [kV];
* Frequência nominal em [Hz];
* Capacitância medida em [F] ou relação C/C_N, onde C_N é a capacitância nominal;
* Categoria de temperatura;
* Nível de isolamento

O nível de isolamento deve ser indicado por dois números separados por uma barra; o primeiro número indica o valor da tensão suportável nominal à frequência nominal em [kV] (valor eficaz) e o segundo indica o valor da tensão suportável nominal de impulso atmosférico em, [kV] (crista);

* A inscrição *"contém fusíveis internos"*, quando aplicável;
* Nome químico ou comercial do impregnante, seguido da palavra *"biodegradável"* se for o caso;
* Número da norma vigente, e o ano da edição;
* Ordem de compra;
* Massa em [kg].

3.3- TERMINAIS

Os terminais de fase são constituídos por isoladores de polipropileno ou cerâmico com pinos de latão estanhados e o terminal de aterramento do tanque deve estar disponível sendo normalmente de latão estanhado [12].

3.4- ALÇAS PARA FIXAÇÃO

As alças para fixação são soldadas nas laterais da caixa e utilizadas para fixar a unidade capacitiva na sua estrutura de montagem.

3.5- PARTE ATIVA DOS CAPACITORES

Os capacitores de potência são constituídos de pequenos capacitores internos, estes pequenos capacitores internos denominam-se de armadura, bobina ou elemento interno. As bobinas, parte ativa dos capacitores, é constituída de eletrodos separados entre si por um dielétrico, como mostrado na figura 6. Estas bobinas são montadas no interior da caixa metálica e ligados adequadamente em série, paralelo ou série-paralelo, de forma a resultar em uma tensão e potência reativa desejada.

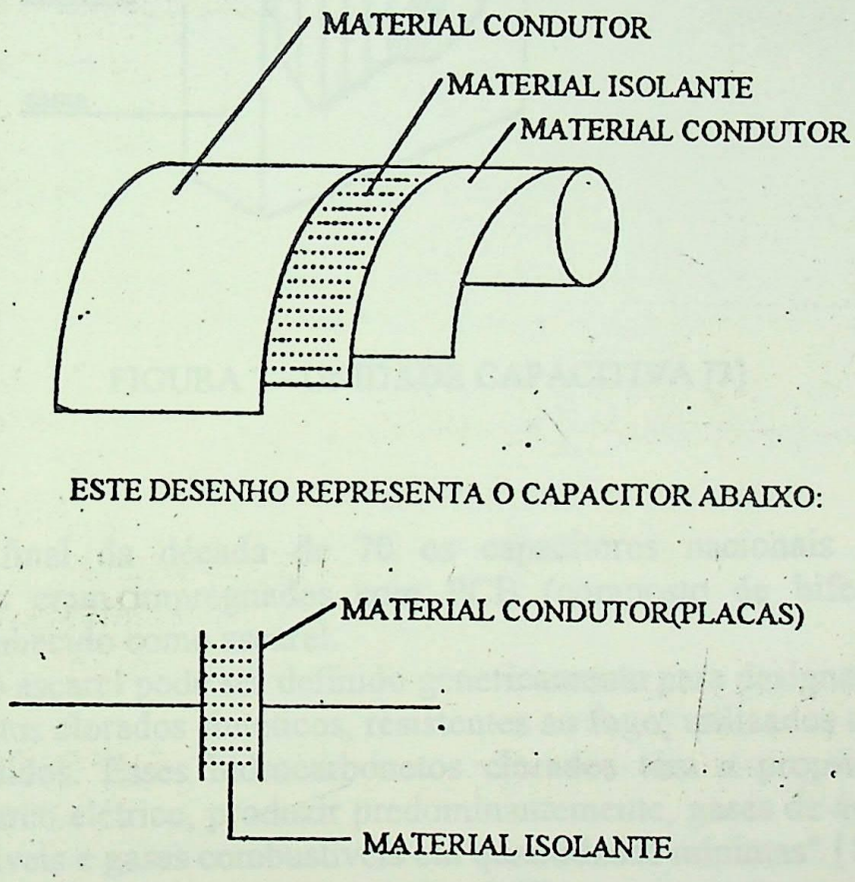


FIGURA 6- BOBINA DE UMA UNIDADE CAPACITIVA

3.6- OLHAIS DE LEVANTAMENTO

Estão no mesmo conjunto das alças de fixação e são utilizadas para levantar a unidade capacitiva. A figura 7, mostra uma unidade capacitiva completa.

4- MATERIAL DIELÉTRICO

Serão descritos alguns tipos de fabricação de capacitores com relação ao material utilizado como dielétrico.

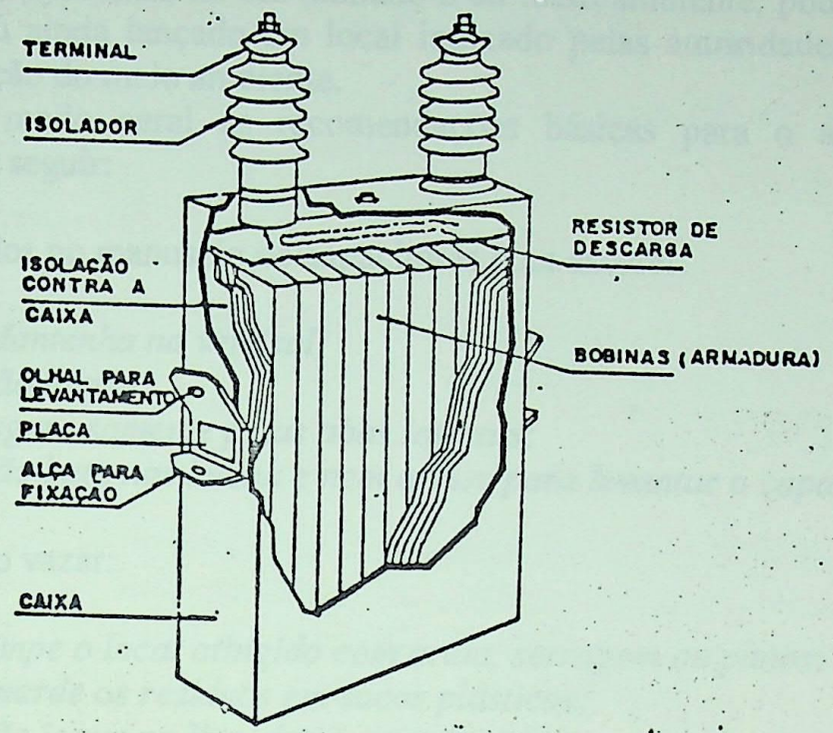


FIGURA 7 - UNIDADE CAPACITIVA [3]

Até o final da década de 70 os capacitores nacionais e mesmo os internacionais eram impregnados com PCB (composto de bifenil clorado e benzeno), conhecido como ascarel.

O termo ascarel pode ser definido genericamente para designar um grupo de hidrocarbonetos clorados sintéticos, resistentes ao fogo, utilizados como isolantes elétricos líquidos. Esses hidrocarbonetos clorados têm a propriedade de, em presença de arco elétrico, produzir predominantemente, gases de ácido clorídrico não combustíveis e gases combustíveis em quantidades mínimas" [18].

Os materiais isolantes, que contêm PCB, apresentam-se comercialmente com os seguintes nomes: aroclor, asbestal, askarel, clorextal, chopen, diaclor, phenoclor, inerteen, etc.

O ascarel embora sendo um dos melhores isolantes conhecidos é um produto não biodegradável e prejudicial à saúde, provocando lesões dermatológicas, alterações psíquicas e morfológicas nos dentes, fígado e rins, perda de libido e efeitos teratogênicos e cancerígenos.

O PCB é tóxico biacumulativo , isto é, acumula-se no organismo durante anos e o seu efeito é lento.

Os ascaréis não são biodegradáveis, quando lançados no meio ambiente podem atingir o plancto, de onde se transferem para os peixes, pássaros e, finalmente para o ser humano.

A legislação Brasileira através da portaria inter-ministerial n° 019 publicada em 19/01/81 proíbe qualquer equipamento de contenha elementos bifenilas policloradas (PCB).

A eliminação do PCB significa sua destruição ou transformação em outros produtos não prejudiciais ao ser humano e ao meio ambiente, pode ser feito por incineração ou ainda lançado em local indicado pelas autoridades responsáveis pela conservação do meio ambiente.

De um modo geral as recomendações básicas para o ascarel são as relacionadas a seguir:

* Cuidados no manuseio de capacitores com ascarel:

- *Mantenha na vertical;*
- *Não tombe;*
- *Segure somente pelas abas laterais;*
- *Não bata nas bucha e nem as use para levantar o capacitor;*

* Quando vazar:

- *Limpe o local atingido com areia, serragem ou panos;*
- *Guarde os resíduos em sacos plásticos;*
- *Não jogue no lixo, água, esgoto, etc;*
- *Guarde os sacos plásticos em tambores galvanizados;*
- *Não use solventes (gasolina, thinner, etc.);*

* Primeiros socorros:

Olhos	-	Lave com água durante 15 minutos;
Pele	-	Lave com água e sabão neutro;
Aspiração	-	Respire ar fresco;
Ingestão	-	Tome um copo de vaselina líquida e procure um médico imediatamente.

É proibido comer, beber ou fumar em presença de equipamentos que contenham ascarel.

Visto que os isolantes ascaréis são prejudiciais ao ser humano, os fabricantes passaram então a produzir outros líquidos impregnantes não contaminantes e biodegradáveis e até mesmo capacitores a seco.

⇒ CAPACITORES A SECO

Conforme [12], este tipo de capacitor é projetado sem líquido impregnante.

As bobinas são feitas de elemento de baixa espessura (filme) de modo a constituir dielétrico, o material empregado é o polipropileno metalizado (ver figura 8). Por vezes aplica-se ao filme uma camada metálica e desta forma cada terminal terá dois lados: um condutor e um isolante.

A caixa metálica é de granulado inorgânico inerte e segundo o fabricante, não inflamável para absorver a energia produzida ou eliminar a possibilidade de fogo em uma eventual sequência de falhas.

⇒ POLIURETANA A BASE DE ÓLEO VEGETAL

Conforme [16], fabricados com filme de polipropileno metalizado e imersos em substância poliuretana a base de óleo vegetal.

⇒ ÉCOLEO 200

Conforme [14], é um líquido sintético com estrutura molecular formada unicamente por carbono e hidrogênio e é um líquido isolante biodegradável.

⇒ WENCOL

Conforme [15], wencol é um fluído dielétrico não polarizado, biodegradável e não poluente ao meio ambiente. É largamente utilizado internacionalmente. Possui grande resistência às descargas parciais, geradas por altas tensões de fadiga associadas às severas condições de sobretensão ac.

⇒ INDOL-I

Conforme [13], indol-I é um líquido biodegradável de excelentes qualidades e alto coeficiente de transmissão de calor. Não corrosivo, baixa toxidade, composto basicamente de phentl-xylyl-ethane (PXE).

5- RESISTOR DE DESCARGA

O dispositivo interno de descarga, é um resistor de modo a desenergizar o capacitor e estando com uma tensão contínua máxima de $\sqrt{2}U_N$, deve reduzir a tensão residual até 50 [V] ou menos, em 1 [min] para capacitores com tensão nominal menor de 1000 [V] e de até 5 [min] com capacitores com tensão nominal acima de 1000 [V] [4].

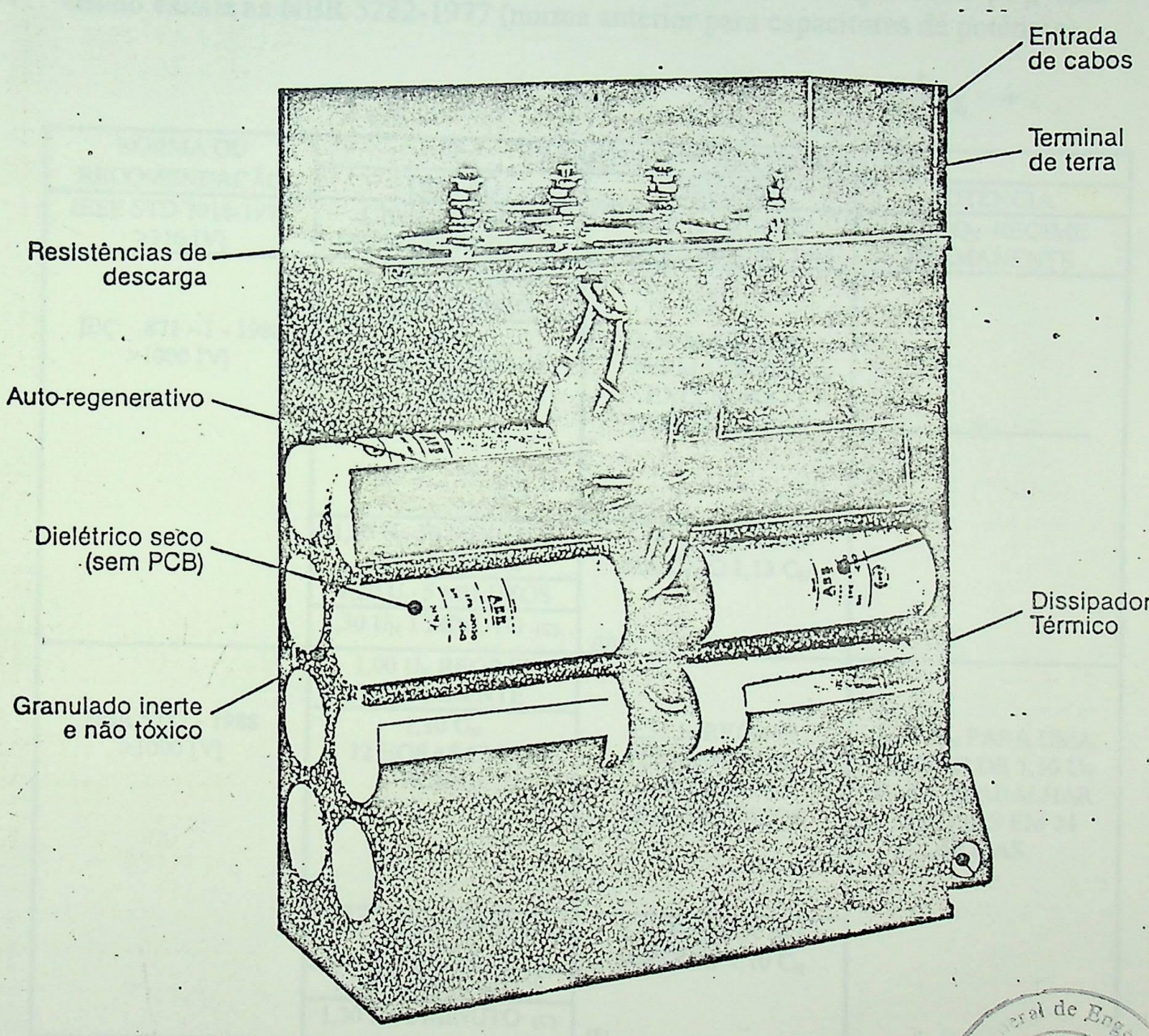
Não deve existir nenhum dispositivo de manobra ou proteção entre a unidade capacitiva e o dispositivo de descarga.

O fato de existir um dispositivo de descarga, não elimina a necessidade de se curto-circuitar os terminais entre si e à terra, antes de qualquer manutenção.

Os circuitos dos dispositivos de descarga devem ter uma capacidade de condução de corrente suficiente para descarregar o capacitor, a partir de uma tensão de valor igual a $2,6U_N$.

Para bancos de capacitores com mais de uma unidade em série, a tensão através dos terminais do banco não pode ser maior que 50 [V], após 5 [min], devido ao efeito acumulativo da tensão residual de cada unidade. O tempo de descarga, dos bancos de capacitores, para atingir 50 [V], deve ser fornecido pelo fabricante no seu manual de instrução e na placa de identificação do banco.

Os capacitores ligados diretamente a outros equipamentos elétricos, providos de caminho de descarga, podem ser considerados como adequadamente descarregados, desde que as características do circuito atendam os requisitos mencionados.



Biblioteca MAUÁ BIM

FIGURA 8 - CAPACITOR A SECO [12]

6- CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS ([4],-[8], [5], [11], [10], [9], [6])

6.1- CARACTERÍSTICAS DE LONGA DURAÇÃO

As tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 a seguir relacionam as diferenças encontradas ao comparar as normas NBR ([4] e [8]), IEC ([5] e [11]), NEMA [10] e ANSI [9] e as recomendações IEEE [6] envolvendo sobretensões, sobrecorrentes, limites de potência, temperatura ambiente, tolerâncias de variação da capacitância e limites de harmônicos para banco de capacitores e níveis de impulso (BIL). A norma da ABNT 5282-1988, deixou de levar em consideração o ensaio de níveis de impulso (BIL) para tensões menores que 1000 [V], este ensaio existia na NBR 5282-1977 (norma anterior para capacitores de potência).

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS		
	TENSÃO	CORRENTE	POTÊNCIA
IEEE STD 1018-1992 >216 [V]	1,10 U_N REGIME PERMANENTE (A)	1,80 I_N REGIME PERMANENTE (B)	1,35 Q_N REGIME PERMANENTE
IEC 871 - 1 - 1988 >1000 [V]	1,00 U_N REGIME PERMANENTE	1,30 I_N REGIME PERMANENTE, EXCLUINDO TRANSI-TÓRIOS	——X——
	1,10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS		
	1,15 U_N 30 MINUTOS EM 24 HORAS	1,50 I_N PARA NO MÁXIMO 1,15 C_N	
	1,20 U_N 5 MINUTOS		
	1,30 U_N 1 MINUTO (C)	(D)	
NBR 5282 - 1988 >1000 [V]	1,00 U_N REGIME PERMANENTE	1,31 I_N REGIME PERMANENTE, EXCLUINDO TRANSI-TÓRIOS	1,44 Q_N PARA UMA TENSÃO DE 1,10 U_N PARA TRABALHAR 12 HORAS EM 24 HORAS
	1,10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS		
	1,15 U_N 30 MINUTOS EM 24 HORAS	1,44 I_N PARA NO MÁXIMO 1,10 C_N	
	1,20 U_N 5 MINUTOS		
	1,30 U_N 1 MINUTO (C)	(E)	
ANSI/IEEE STD 18-1980 >216 [V]	1,10 U_N REGIME PERMANENTE (A)	1,80 I_N REGIME PERMANENTE (B)	1,35 Q_N REGIME PERMANENTE
NEMA PUB NO CP1 - 1973 >216 [V]	1,10 U_N REGIME PERMANENTE (A)	2,50 I_N REGIME PERMANENTE (F,B)	1,35 Q_N REGIME PERMANENTE

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA DE VÁRIAS NORMAS E RECOMENDAÇÕES

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS					
	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO EM [°C]				TOLERÂNCIA CAPACITIVA	HARMÔNICOS
IEEE STD 1018-1992 > 216 [V]	LETRA	MÉDIA EM 24 HORAS	NORMAL ANUAL		A CAPACITÂNCIA MEDIDA NÃO DEVE FAZER EXCEDER A POTÊNCIA NOMINAL DE 1.15 Q_N	INCLUÍDO NOS LIMITES DE TENSÃO E CORRENTE
	G_1	46	35			
	G_2	46	35			
	G_3	40	25			
	G_4	40	25			
	TEMPERATURA MÍNIMA É DE -10[°C] (G)					
NBR 5282-1988 >1000 [V]	CATEGORIA	MAX	MÉDIA MAXIMA EM UM PERÍODO		-5% A+10% P/ UNIDADE CAPACITIVAS E BANCOS ATÉ 3 [MVAr]	ACORDO ENTRE FABRICANTE E COMPRADOR
			24 HORAS	1 ANO		
	A	40	30	20	0 A +10% P/ BANCOS DE 3 A 30 [MVAr]	
	B	45	35	25		
	C	50	40	30	0 A +5% P/ BANCOS ACIMA DE 30[MVAr]	
	D	55	45	35		
	TEMPERATURAS MÍNIMAS PADRONIZADAS -5[°C], [+5[°C] E -25[°C] (H)					
IEC 871-1-1988 >1000 [V]	CATEGORIA	MAX	MÉDIA MAXIMA EM UM PERÍODO		-5% A 15% P/ UNIDADE CAPACITIVA OU BANCOS QUE CONTENHAM UMA UNIDADE POR FASE	ACORDO ENTRE FABRICANTE E COMPRADOR
			24 HORAS	1 ANO		
	A	40	30	20	-5% A +10% P/ BANCOS ATÉ 3 [MVAr]	
	B	45	35	25	0% A +10% P/ BANCOS DE 3 A 30 [MVAr]	
	C	50	40	30	0 A +5% P/ BANCOS ACIMA DE 30[MVAr]	
	D	55	45	35		
	TEMPERATURAS MINIMAS PADRONIZADAS +5[°C], -5[°C], -25[°C], -40[°C] E -50[°C] (H)					

TABELA 4- CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA, TOLERÂNCIA DE CAPACITÂNCIA E LIMITES HARMÔNICOS DE VÁRIAS NORMAS E RECOMENDAÇÕES

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS				
	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO EM [°C]			TOLERÂNCIA CAPACITIVA	HARMÔNICOS
ANSI/IEEE STD-18 1992 > 216 [V]	LETRA	MÉDIA EM 24 HORAS	NORMAL ANUAL	A CAPACITÂNCIA MEDIDA NÃO DEVE FAZER EXCEDER A POTÊNCIA NOMINAL DE 1,15 Q_N	INCLUÍDO NOS LIMITES DE TENSÃO E CORRENTE
	G_1	46	35		
	G_2	40	25		
	G_3	35	20		
	G_4	35	20		
	TEMPERATURA MÍNIMA É DE -40[°C] (G)				
NEMA PUB NO CP1-1973 > 216 [V]	LETRA	MÉDIA EM 24 HORAS	NORMAL ANUAL	A CAPACITÂNCIA MEDIDA NÃO DEVE FAZER EXCEDER A POTÊNCIA NOMINAL DE 1,15 Q_N	OS LIMITES ESTÃO INCLUÍDOS NO GRÁFICO DA FIGURA(9) (J)
	G_1	46	35		
	G_2	40	25		
	G_3	35	20		
	G_4	35	20		
	TEMPERATURA MÍNIMA É DE -40[°C] (G)				

TABELA 4 - CONTINUAÇÃO

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS		
	TENSÃO	CORRENTE	POTÊNCIA
NBR 5282 - 1977 ≤220 [V]	1,10 U_N REGIME PERMANENTE (A)	1,80 I_N REGIME PERMANENTE (B)	1,35 Q_N REGIME PERMANENTE
IEC 871 - 1 - 1988 ≤ 1000 [V]	1,00 U_N REGIME PERMANENTE	1,30 I_N REGIME PERMANENTE, EXCLUINDO TRANSI-TÓRIOS	——X——
	1,10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS		
	1,15 U_N 30 MINUTOS EM 24 HORAS	1,50 I_N PARA NO MÁXIMO 1,15 C_N	
	1,20 U_N 5 MINUTOS		
	1,30 U_N 1 MINUTO (C)	(D)	

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA DA IEC E NBR

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS					
	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO EM [°C]				TOLERÂNCIA CAPACITIVA	HARMÔNICOS
	LIMITE MÁXIMO	TEMPERATURA AMBIENTE MÁXIMA EM MÉDIA				
		1 HORA	24 HORAS	1 ANO		
NBR 5282-1977 ≤220 [V]	40	40	30	20	5% A+10% PARA UNIDADES CAPACITIVAS 0% A+10% PARA BANCOS DE CAPACITORES (I)	ACORDO ENTRE FABRICANTE E COMPRADOR
	45	45	40	30		
	50	50	45	35		
	TEMPERATURAS MÍNIMAS PADRONIZADAS -40[°C], -25[°C] E -10[°C] (H)					
IEC 831-1-1988 ≤1000 [V]	CATEGORIA	MÁX	MÉDIA MÁXIMA EM UM PERÍODO		+5% A +15% PARA UNIDADE CAPACITIVA E BANCOS ATÉ 100 [kVAr]	ACORDO ENTRE FABRICANTE E COMPRADOR
			24 HORAS	1 ANO		
	A	40	30	20		
	B	45	35	25	0% A +10% PARA BANCOS ACIMA DE 100 [kVAr] (I)	
	C	50	40	30		
	D	55	45	35		
	TEMPERATURAS MÍNIMAS PADRONIZADAS +5[°C], -5[°C], -25[°C], -40[°C] E -50[°C] (H)					

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA, TOLERÂNCIAS DE CAPACITÂNCIA E HARMÔNICOS DA NBR E IEC

TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO $U_{máx}$ [kV] (VALOR EFICAZ)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO [kV] (VALOR DE CRISTA)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL [kV] (VALOR EFICAZ) À FREQUÊNCIA NOMINAL DURANTE 1 MINUTO	FRENTE DE ONDA
1,2	30	10	1,2 / 50 [µS]
7,2	40 60	20	
15	95 110	34	
24,2	125 150	34 50	
36,2	150 170 200	50 70	
72,5	350	140	
92,4	380 450	150 185	
145	450 550 650	185 230 275	
242	750 850 950	325 360 395	

TABELA 7 - NÍVEIS DE ISOLAMENTO PARA TENSÕES DE ATÉ 242 [kV], SEGUNDO ABNT [8]

TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO $U_{máx}$ [kV] (VALOR EFICAZ)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO DE MANOBRA [kV] (VALOR DE CRISTA)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO [kV] (VALOR DE CRISTA)	FRENTE DE ONDA
362	850 950	950 1050 1175	1,2 / 50 [µS]
460	1050	1300 1425	
550	1050 1175 1300	1300 1425 1550	
800	1425 1550	1800 1950 2100	

TABELA 8 - NÍVEIS DE ISOLAMENTO PARA TENSÕES MÁXIMAS IGUAIS OU SUPERIORES A 362 [kV], SEGUNDO ABNT [8]

TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO U_{max} [kV] (VALOR EFICAZ)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO [kV] (VALOR DE CRISTA)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL [kV] (VALOR EFICAZ) À FREQUÊNCIA NOMINAL DURANTE 1 MINUTO	FRENTE DE ONDA
1,2	25	6	1,2 ATÉ 5 / 50 [μS]
2,4	35	8	
3,6	20 40	10	
7,2	40 60	20	
12,0	60 75	28	
17,5	75 95	38	
24	95 125	50	
36	145 170	70	

TABELA 9 - NÍVEIS DE ISOLAMENTO PARA TENSÕES < 52 [kV], SEGUNDO IEC [11]

TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO U_{max} [kV] (VALOR EFICAZ)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO [kV] (VALOR DE CRISTA)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL [kV] (VALOR EFICAZ) À FREQUÊNCIA NOMINAL DURANTE 1 MINUTO	FRENTE DE ONDA
52	250	95	1,2 ATÉ 5 / 50 [μS]
72,5	325	140	
123	450 550	185 230	
145	450 550 650	185 230 275	
170	550 650 750	230 275 325	
245	650 750 850 950 1050	275 325 360 395 460	

TABELA 10 - NÍVEIS DE ISOLAMENTO PARA TENSÕES 52 [kV] ≤ U_{MAX} < 300 [kV], SEGUNDO IEC [5]

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca Mauá BIM

TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO U_{max} [kV] (VALOR EFICAZ)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO [kV] (VALOR DE CRISTA)	TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL [kV] (VALOR EFICAZ) À FREQUÊNCIA NOMINAL DURANTE 1 MINUTO	FRENTE DE ONDA
300	750 850	850 950 1050	1,2 ATÉ 5 / 50 [μS]
362	850 950	950 1050	
420	950 1050	1050 1175 1300 1425	
525	1050 1175	1175 1300 1425 1550	
765	1300 1425 1550	1425 1550 1800 1950 2100 2400	

TABELA 11 - NÍVEIS DE ISOLAMENTO PARA TENSÕES ≥ 300 [kV], SEGUNDO IEC [5]

CLASSE DE TENSÃO EM VALOR EFICAZ DO CAPACITOR EM [V]	NÍVEL DE IMPULSO TENSÃO DE PICO EM [kV]	FRENTE DE ONDA
216-1199	30*	1,2 / 50 [μS] OU 1,5 / 40 [μS]
1200-5000	75	
5001	95	
13200-25000	125	

TABELA 12- NÍVEIS DE IMPULSO, SEGUNDO O IEEE [6]

CLASSE DE TENSÃO EM VALOR EFICAZ DO CAPACITOR EM [V]	CLASSE DE ISOLAÇÃO EM [kV]	TESTE DE IMPULSO VALOR DE PICO EM [kV]	FRENTE DE ONDA
216-1199	1,2	30*	1,2 / 50 [μS]
1200-5000	8,7	75	
5001-15000	15,0	95	
13200-15000	18,0	125	

TABELA 13 - NÍVEIS DE IMPULSO SEGUNDO NEMA [10]

onde:

U_N - Tensão nominal;
I_N - Corrente nominal;
C_N - Capacitância nominal;
Q_N - Potência nominal do capacitor.

NOTAS SOBRE AS TABELAS:

* Não aplicados a capacitores de uso interno.

A - Incluindo harmônicos e excluindo transitórios;
B - Incluindo o componente fundamental e harmônicos de corrente;
C - É assumido que as sobretensões deve ter um valor não superior que $1{,}15U_N$, para um máximo de 200 ocorrências na vida do capacitor;
D - O valor da capacitância não pode exceder à $1{,}15C_N$, e a corrente máxima permissível neste caso é de $1{,}5I_N$. Conforme [5], estes fatores de sobrecorrente levam em consideração os efeitos das sobretensões e harmônicos de acordo com as tabelas 3 e 5;
E - O valor da capacitância não pode exceder à $1{,}10C_N$, a corrente máxima permissível neste caso é de $1{,}44\ I_N$. Conforme [4], estes fatores de sobrecorrente são levados em consideração os efeitos das sobretensões e harmônicos de acordo com a tabela 3;
F - Para capacitores acima de 2400 [V], Para capacitores abaixo de 2400 [V], o limite de corrente pode ser menor como especificado pelo fabricante;
G - Significado das letras

G_1- Capacitor isolado;
G_2- Fileira monofásica de capacitores;
G_3- Várias linhas e colunas de capacitores;
G_4- Equipamentos metal-encapsulados ou abrigados.

H - As letras A, B, C e D significam os limites máximos de temperatura das categorias dos capacitores;
I - A capacitância medida não pode fazer exceder os limites de potência nominal relatados na tabela 6 em condições de tensão e frequências nominais;
J - Deve-se ter o cuidado com o gráfico da figura 9, pois os limites de harmônicos estabelecidos servem apenas para o componente fundamental e um componente harmônico. Os valores de potência, tensão e corrente não devem ser excedidos com os valores da norma NEMA da tabela 5 [10]. As equações (10),(11) e (12) mostram as equações que regem o gráfico da figura 9.

$$S_1 + S_n = 1{,}35Q_N \qquad (10)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{U_1^2 + U_n^2} \leq 1{,}1U_N \quad (11)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_n^2} \leq 2{,}5I_N \quad (12)$$

onde:

- S_1 - Potência aparente na frequência fundamental;
- U_1 - Tensão na frequência fundamental;
- I_1 - Corrente na frequência fundamental;
- S_n - Potência aparente para um harmônico de ordem n;
- Q_N - Potência nominal do capacitor;
- U_n - Tensão para um harmônico de ordem n;
- I_n - Corrente para um harmônico de ordem n.

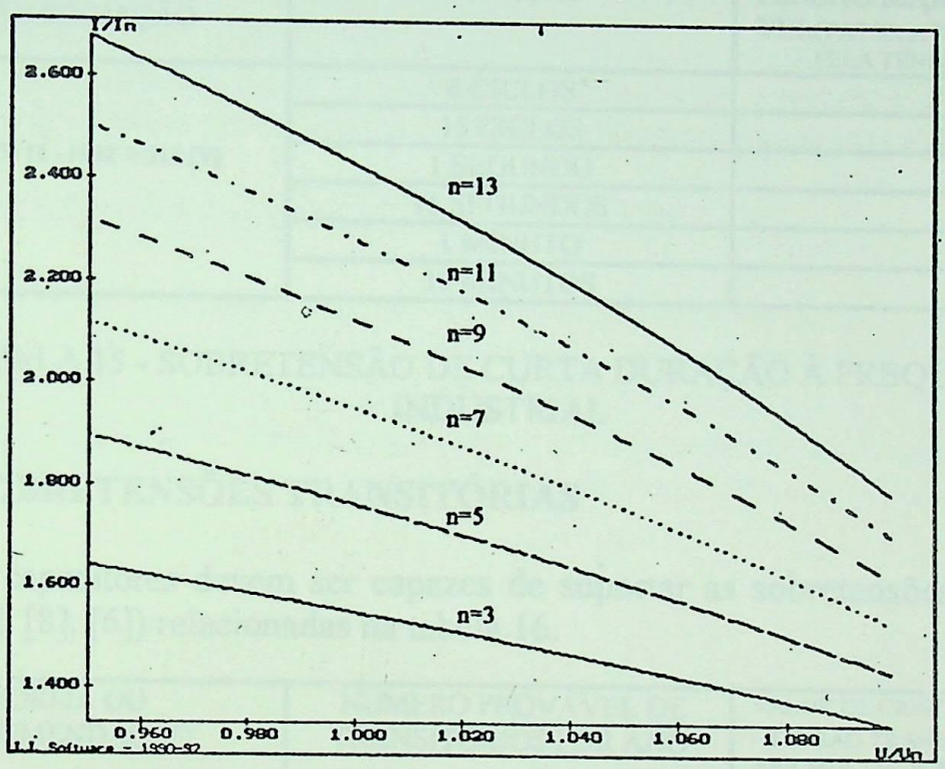


FIGURA 9- LIMITES DOS HARMÔNICOS SEGUNDO A NEMA [10]

6.2- CARACTERÍSTICAS DE CURTA DURAÇÃO

Serão mostradas características de tensão e corrente de algumas normas e recomendações, no que dizem respeito aos limites de sobretensão e sobrecorrente ocorridos em curto período de tempo.

6.2.1- SOBRETENSÕES DE CURTA DURAÇÃO À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

Um capacitor deve ser capaz de suportar durante a sua vida normal um total combinado de 300 aplicações ([10], [9], [8], [6]) de sobretensão de terminal a terminal, na frequência industrial, sem superposição de transitórios, de amplitude e durações relacionadas nas tabelas 14 e 15.

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	DURAÇÃO	TENSÃO MÁXIMA PERMISSÍVEL (FATOR A SER MULTIPLICADO PELA TENSÃO NOMINAL)
NBR 5282-1979 >220 [V]; NEMA NO CP1-1979 > 1000 [V]; ANSI/IEEE STD 18-1980 > 216 [V],	0,5 CICLO	3,0
	1,0 CICLO	2,7
	15 CICLOS	2,0
	60 CICLOS	1,75
	16 SEGUNDOS	1,40
	1 MINUTO	1,30
	15 MINUTOS	1,20
	60 MINUTOS	1,15

TABELA 14 - SOBRETENSÃO DE CURTA DURAÇÃO À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	DURAÇÃO	TENSÃO MÁXIMA PERMISSÍVEL(FATOR A SER MULTIPLICADO PELA TENSÃO NOMINAL)
IEEE STD 18 - 1992 > 216 [V]	6 CICLOS	2,20
	15 CICLOS	2,00
	1 SEGUNDO	1,70
	15 SEGUNDOS	1,40
	1 MINUTO	1,30
	30 MINUTOS	1,25

TABELA 15 - SOBRETENSÃO DE CURTA DURAÇÃO À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL

6.2.2- SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS

Os capacitores devem ser capazes de suportar as sobretensões transitórias ([10], [9], [8], [6]) relacionadas na tabela 16.

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	NÚMERO PROVÁVEL DE TRANSITÓRIOS POR ANO	VALOR DE CRISTA PERMISSÍVEL DA TENSÃO TRANSITÓRIA (FATOR A SER MULTIPLICADO PELA TENSÃO NOMINAL)
NBR 5282-1979 >220 [V]	4	5,0
NEMA NO CP1-1979 > 1000 [V]	40	4,0
ANSI/IEEE STD 18-1980 > 216 [V]	400	3,4
IEEE STD 18-1992 > 216 [V]	4000	2,9

TABELA 16 - SOBRETENSÃO TRANSITÓRIA

As normas NBR 5282-1988, IEC 871-1-1988 e 831-1-1988 aplicadas à tabela 16, a tensão de crista não deve exceder a $2\sqrt{2}$ da tensão aplicada (valor eficaz) com duração máxima de meio ciclo.

6.2.3- SOBRECORRENTE TRANSITÓRIA

Os capacitores devem ser capazes de suportar picos de corrente de descarga ([10], [9], [8], [6]) relacionados na tabela 17.

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	NÚMERO PROVÁVEL DE TRANSITÓRIOS POR ANO	VALOR DE CRISTA PERMISSÍVEL DA CORRENTE TRANSITÓRIA (FATOR A SER MULTIPLICADO PELA CORRENTE NOMINAL)
NBR 5282-1979 > 220 [V]	4	1500
NEMA NO CP1-1979 > 1000 [V]	40	1150
ANSI/IEEE STD 18-1980 > 216 [V]	400	800
IEEE STD 18-1992 > 216 [V]	4000	400

TABELA 17 - SOBRECORRENTE TRANSITÓRIA

Admitindo-se que os capacitores possam ser operados 1000 vezes por ano nestas condições, a crista de sobrecorrente transitória associada pode alcançar 100 vezes o valor da corrente nominal (I_N).

OBSERVAÇÃO: No caso em que os capacitores sejam operados mais frequentemente, os valores de amplitude e a duração da sobretensões e sobrecorrentes transitórias devem ser limitadas a níveis maiores. Estas limitações e/ou reduções devem ser objeto de comum acordo entre fabricante e comprador.

7- CAPACITORES COM FUSÍVEL EXTERNO

Os fusíveis externos protegem as unidades capacitivas de falhas internas e falha de isolação. Quando operam desativam a unidade capacitiva do circuito. A figura 10 mostra um capacitor protegido por fusível externo. Os fusíveis externos podem ser: fusíveis de expulsão, fusíveis limitadores de corrente ou fusíveis combinados. Serão comentados estes tipos de fusíveis nos próximos capítulos.

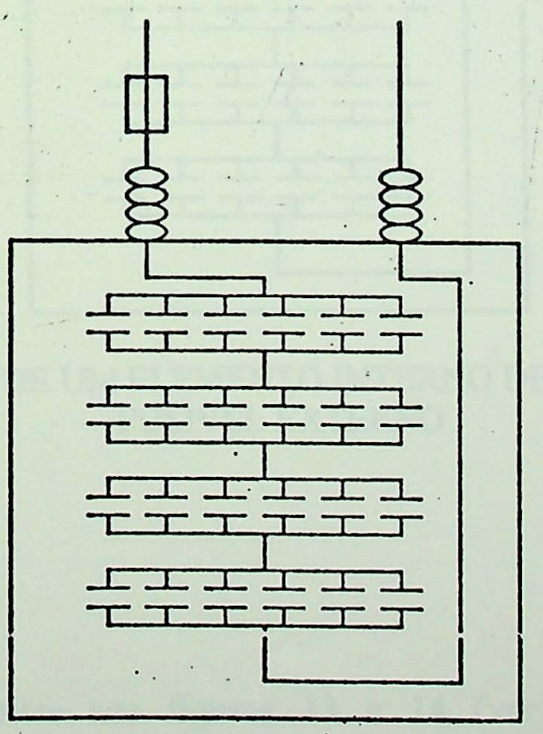
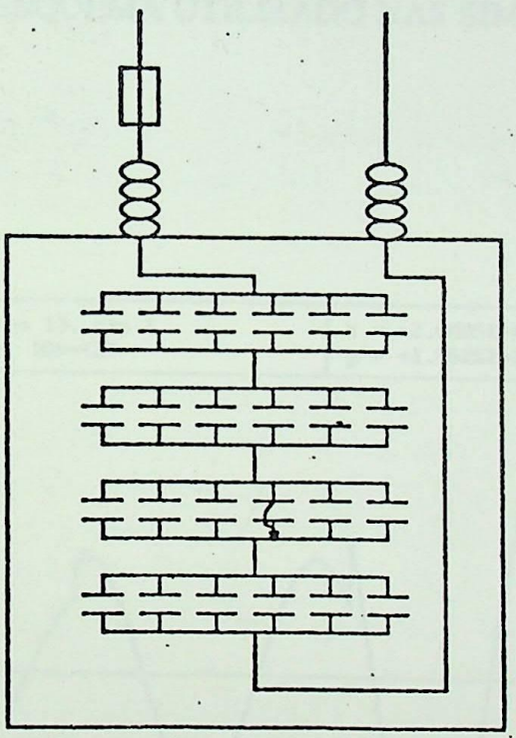


FIGURA 10- UNIDADE CAPACITIVA PROTEGIDA POR FUSÍVEL EXTERNO

Os capacitores com fusível externo, são elaborados de pequenas unidades capacitivas (bobinas) em série-paralelo, esta conexão série paralelo depende da tensão e potência desejada da unidade capacitiva.

A figura 11 mostra uma falha (curto-circuito) em um elemento interno (bobina) de uma unidade capacitiva. A falha em um elemento interno provoca sobrecorrente e sobretensão nos elementos internos restantes (não danificados pelo falha) da unidade capacitiva. A corrente de falha de um elemento defeituoso não é capaz de operar o fusível externo, outras unidades internas deverão falhar para que o mesmo opere. Como os elementos internos restantes estão submetidos a condições anormais, deverá ocorrer novas falhas, com isso os níveis de sobrecorrente e sobretensão por elemento interno irão aumentar progressivamente até que ocorra a operação do fusível. Observa-se então que, uma falha em apenas um elemento interno pode acarretar em danos irreversíveis na unidade capacitiva, retirando-a de operação.



Biblioteca MAUÁ BEM de Itajubá - EFEI

FIGURA 11- FALHA DE UM ELEMENTO INTERNO DE UM CAPACITOR DE FUSÍVEL EXTERNO

A simulações feitas nas figuras 13 e 14 (ver anexo 2), mostram o comportamento da tensão e corrente respectivamente em um elemento interno não defeituoso, quando ocorrem falhas em outros elementos internos de grupos de elementos paralelos diferentes.

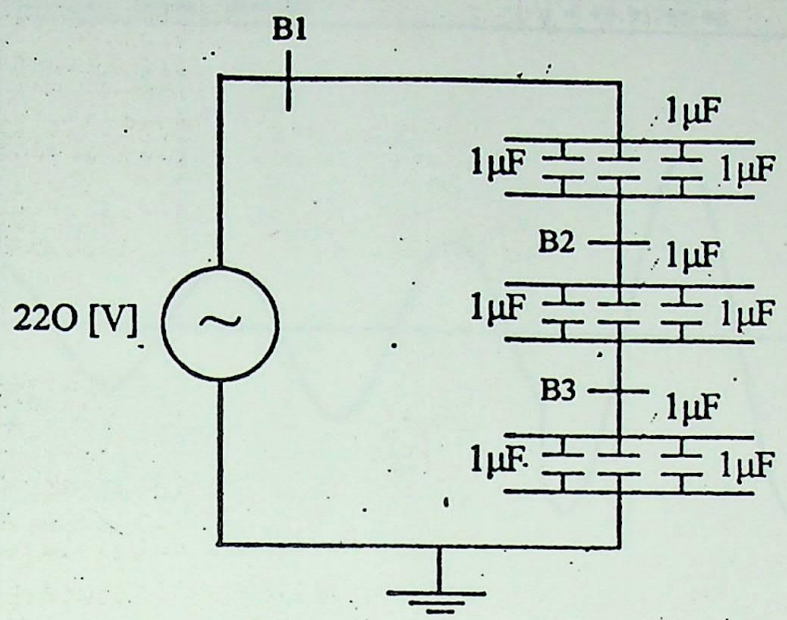


FIGURA 12- ESQUEMA UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

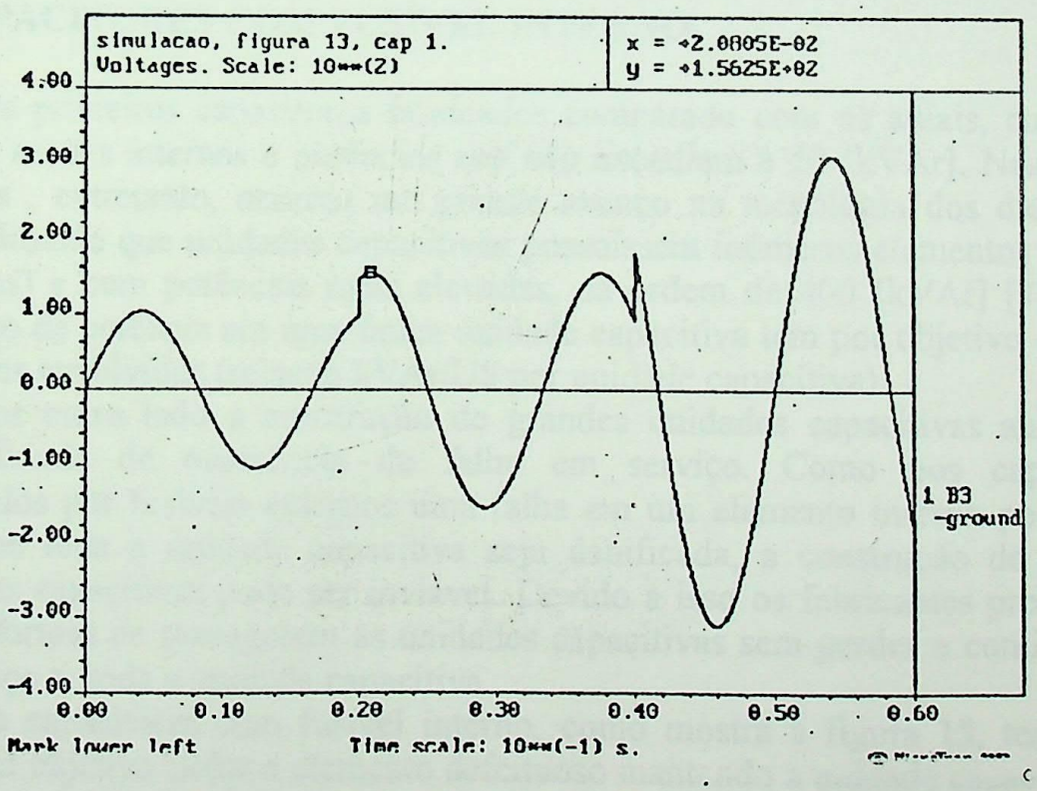


FIGURA 13- COMPORTAMENTO DA TENSÃO EM UM ELEMENTO NÃO DEFEITUOSO, POR FALHAS EM OUTROS ELEMENTOS INTERNOS

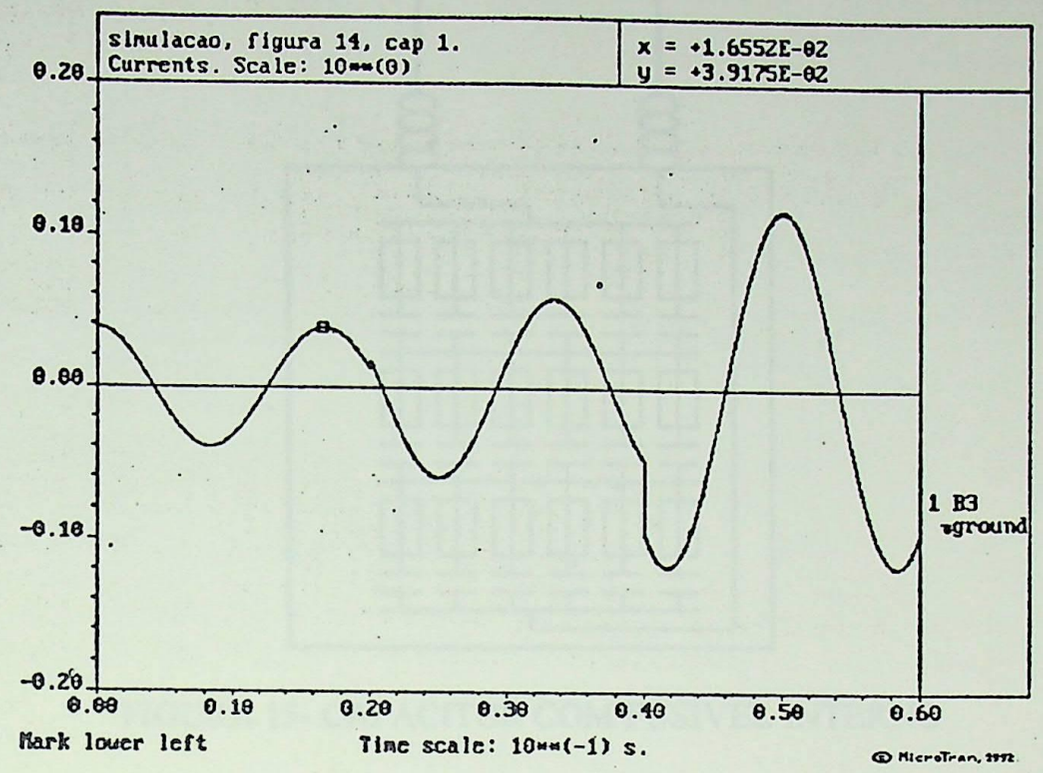


FIGURA 14- COMPORTAMENTO DA CORRENTE EM UM ELEMENTO NÃO DEFEITUOSO, POR FALHAS EM OUTROS ELEMENTOS INTERNOS

8- CAPACITORES COM FUSÍVEL INTERNO

Os primeiros capacitores fabricados comparado com os atuais, continham poucas seções internas e potências que não excediam à 50 [kVAr]. Nas últimas décadas , entretanto, ocorreu um grande avanço na tecnologia dos dielétricos, possibilitando que unidades capacitivas possuíssem inúmeros elementos internos (bobinas) e com potências mais elevadas, na ordem de 400 [kVAr] [46]. Esse aumento de potência em uma única unidade capacitiva tem por objetivo diminuir os custos envolvidos (relação kVAr/U$ por unidade capacitiva).

Por outro lado a construção de grandes unidades capacitivas aumenta a possibilidade de ocorrência de falha em serviço. Como nos capacitores protegidos por fusíveis externos uma falha em um elemento interno pode fazer com que toda a unidade capacitiva seja danificada, a construção de grandes unidades capacitivas pode ser inviável. Devido a isso os fabricantes procuraram outras formas de protegerem as unidades capacitivas sem perder a continuidade de serviço e, toda a unidade capacitiva.

Os capacitores com fusível interno, como mostra a figura 15, tem como principal objetivo isolar o elemento defeituoso mantendo a unidade capacitiva em operação com pouca perda de potência reativa.

A operação dos fusíveis internos pode ocorrer em dois casos: o primeiro, quando a falha do capacitor ocorre com a passagem de tensão por zero, esta possibilidade é muito remota. Na segunda o elemento falha no instante em que a tensão é máxima.

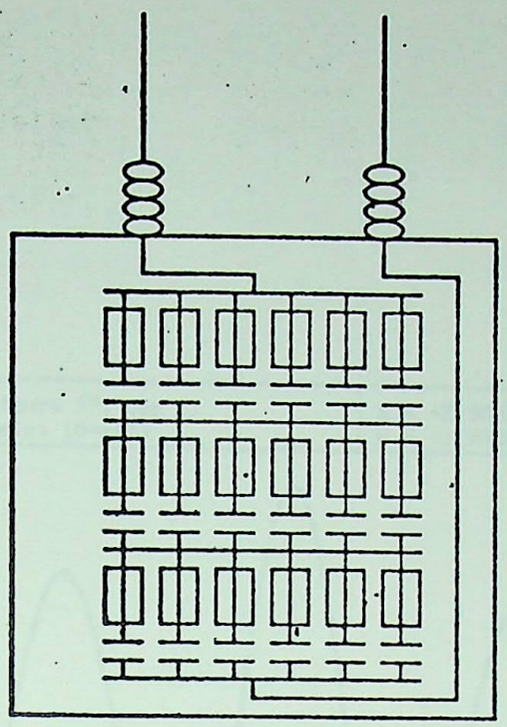
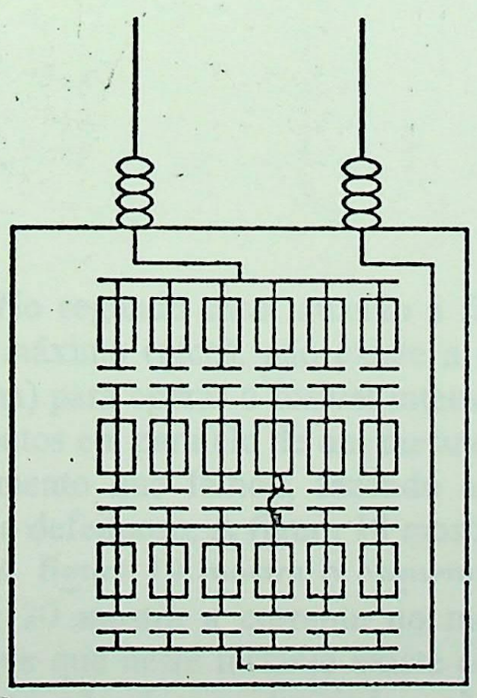


FIGURA 15- CAPACITOR COM FUSÍVEL INTERNO

Quando o capacitor falha no momento da passagem da tensão por zero, não existe energia armazenada nos capacitores e o fusível do elemento interno conta somente com a corrente de falha (corrente injetada pelo sistema) para a sua operação no instante da falha. A figura 16 mostra o princípio de funcionamento e a figura 17 mostra a forma de onda da corrente obtida para uma simulação de uma falha de uma unidade capacitiva (ver anexo 3). Pode-se observar que a corrente de pico não é praticamente afetada pela descarga das unidades capacitivas em paralelo do mesmo grupo, mas do sistema. As aberturas dos fusíveis foram simuladas através de chaves em série com o capacitor defeituoso.



Observe que quando o elemento falha, o fusível retira o elemento defeituoso de operação e o capacitor continua operando, resguardando assim, a continuidade de serviço.

FIGURA 16- FUNCIONAMENTO DO CAPACITOR COM FUSÍVEL INTERNO

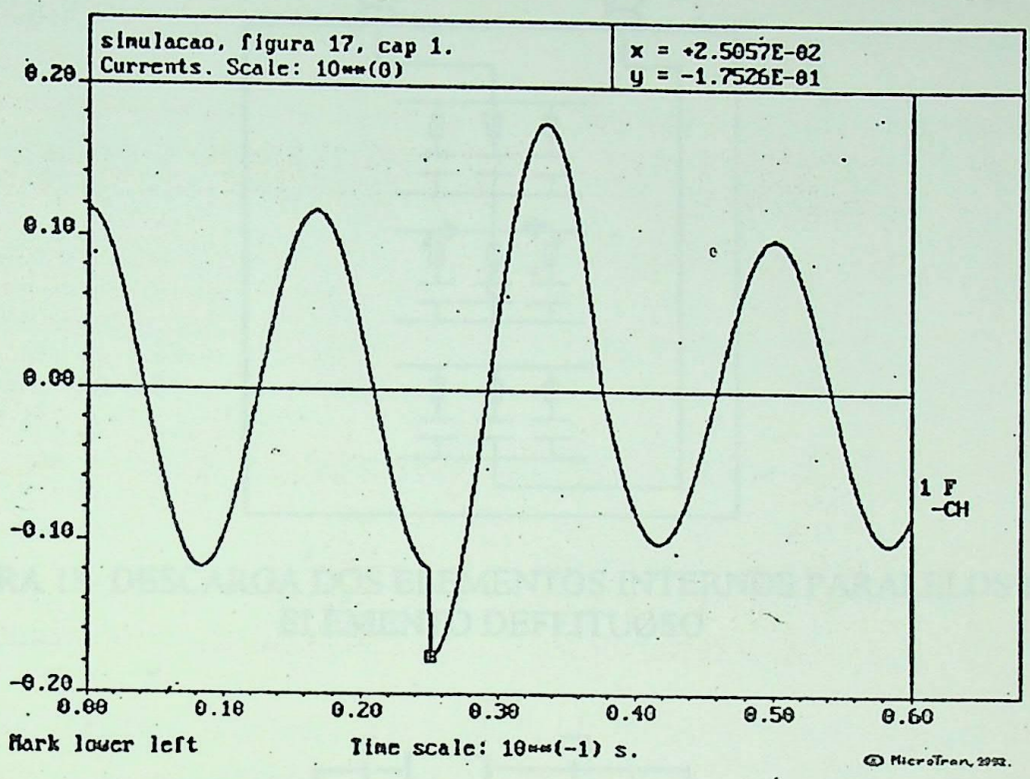


FIGURA 17- CORRENTE NA UNIDADE CAPACITIVA APÓS FALHA EM UM ELEMENTO INTERNO

No segundo caso, quando a falha ocorre na passagem da tensão pelo seu nível máximo (pico), não existe a corrente de falha (corrente contribuída pelo sistema) para operar o fusível interno, mas existe energia armazenada nos outros elementos em paralelo de um mesmo grupo, esta energia será descarregada sobre o elemento que falhou, fazendo assim operar o fusível interno do elemento interno defeituoso. A figura 18 mostra esta situação.

A figura 19 mostra o esquema utilizado na simulação (ver anexo 3), e a figura 20 mostra a corrente no momento da falha em um elemento interno. Observe que neste instante existe corrente suficiente para operar o fusível, esta corrente não é providenciada pelo sistema e sim pelos elementos internos paralelos ao elemento defeituoso, já que a corrente do sistema nesse momento é zero.

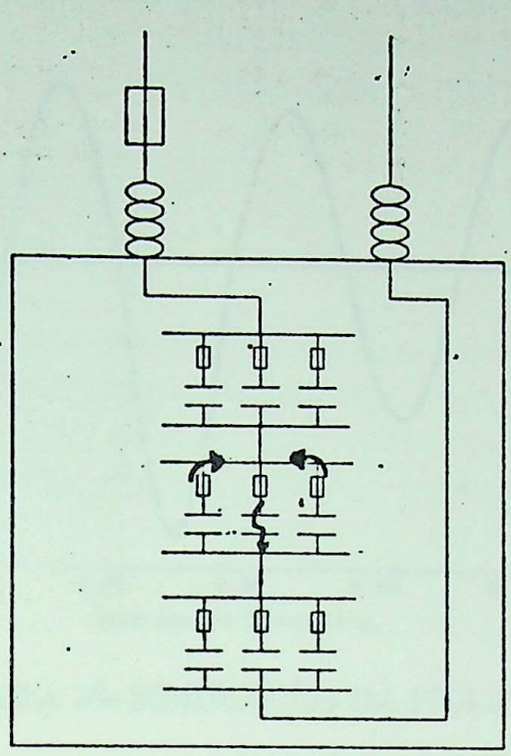


FIGURA 18- DESCARGA DOS ELEMENTOS INTERNOS PARALELOS NO ELEMENTO DEFEITUOSO

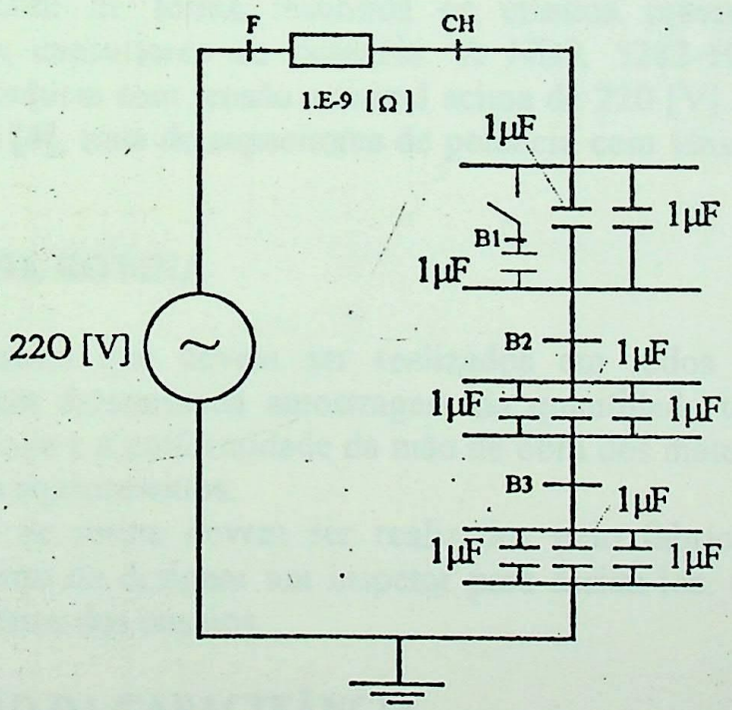


FIGURA 19- ESQUEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DA FIGURA 18

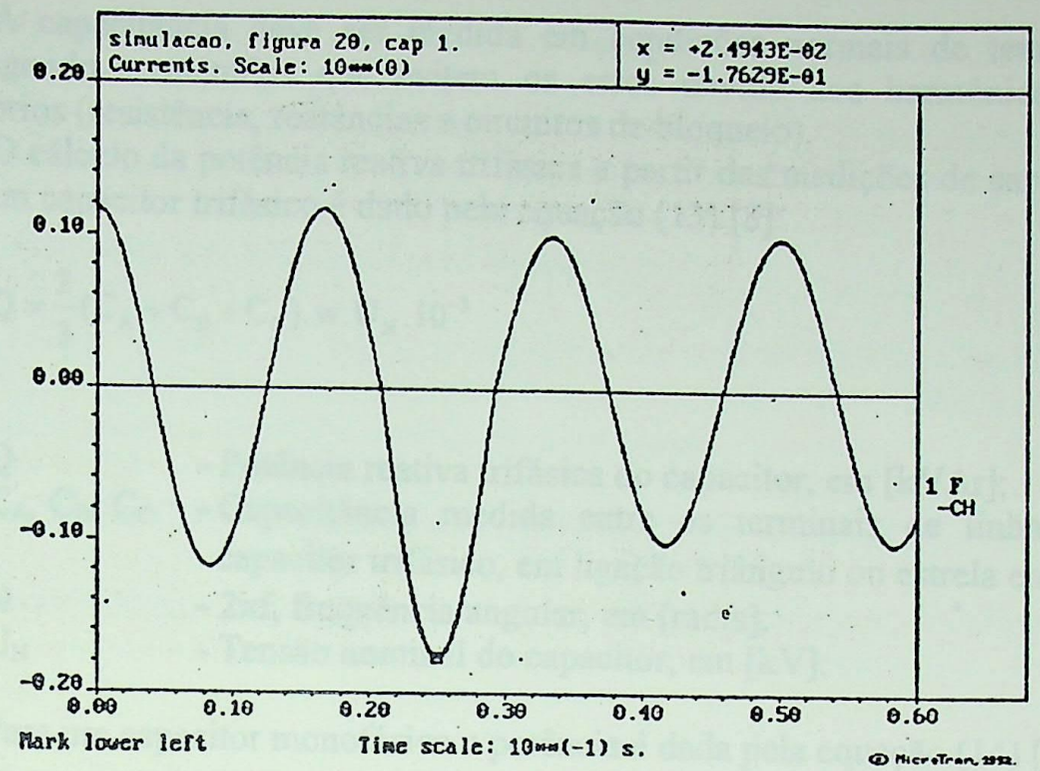


FIGURA 20- SIMULAÇÃO DA FIGURA 18

9- ENSAIOS

Serão descrito de forma resumida os ensaios previstos nas Normas Brasileiras sobre capacitores de potência. A NBR 5282-1977 [8], trata de capacitores de potência com tensão nominal acima de 220 [V] até 1000 [V], já a NBR-5282-1988 [4], trata de capacitores de potência com tensão nominal acima de 1000 [V].

9.1- ENSAIOS DE ROTINA

São os ensaios que devem ser realizados em todos os equipamentos comprados, ou em determinada amostragem da quantidade total, a fim de se verificar a qualidade e a uniformidade da mão de obra dos materiais utilizados na fabricação destes equipamentos.

Os ensaios de rotina devem ser realizados pelo fabricante, cabendo ao comprador o direito de designar um inspetor para assisti-los. O fabricante deve fornecer os relatórios dos ensaios.

9.1.1.- MEDIÇÃO DA CAPACITÂNCIA

Este ensaio tem por objetivo medir a capacitância de cada unidade capacitiva, para verificar se sua potência reativa está dentro da tolerância especificada.

A capacitância deve ser medida em condições normais de temperatura, empregando-se métodos que evitem os erros devido aos harmônicos e aos acessórios (resistência, reatâncias e circuitos de bloqueio).

O cálculo da potência reativa trifásica a partir das medições de capacitância para um capacitor trifásico é dado pela equação (13) [8]:

$$Q = \frac{2}{3}(C_A + C_B + C_C).w.U_N.10^{-3} \qquad (13)$$

onde:

- Q - Potência reativa trifásica do capacitor, em [kVAr];
- C_A, C_B, C_C - Capacitância medida entre os terminais de linha de um capacitor trifásico, em ligação triângulo ou estrela em [μF];
- w - $2\pi f$, frequência angular, em [rad/s].
- U_N - Tensão nominal do capacitor, em [kV];

Para um capacitor monofásico a potência é dada pela equação (14) [8]:

$$Q = U_N^2.w.C.10^{-3} \qquad (14)$$

onde:

- C - Capacitância medida de um capacitor em [μF];
- Q - Potência reativa monofásica do capacitor, em [kVAr];

nota 1- Os ensaios deverão ser feitos com tensão e frequência nominal. Entretanto, as medições podem ser feitas em outras tensões e frequências, desde que os fatores de correções apropriados sejam objeto de acordo entre o fabricante e o comprador [8].

A tensão de ensaio deve está compreendida entre 0,9 e 1,1 vezes a tensão nominal [4].

Se acordado, o comprador pode desejar uma maior precisão na medição da capacitância, a qual cabe ao fabricante estabelecer o método de ensaio [4].

A capacitância medida não deve diferir da capacitância nominal em mais que [4]:

1) -5 a +10% para unidades capacitivas e bancos até 3 [MVAr];
2) 0 a +10% para bancos de 3 [MVAr] até 30 [MVAr];
3) 0 a +5% para bancos acima de 30 [MVAr].

* Para bancos a relação entre as capacitâncias medidas (máxima/mínima) das três fases não deve exceder 1,06 [4].

9.1.2 - MEDIÇÃO DA TANGENTE DO ÂNGULO DE PERDAS

Cada capacitor tem medida as suas perdas ativa ou então a relação entre as perdas ativa e a potência reativa (tg δ, usualmente expressa em W/kVAr).

A tangente do ângulo de perdas deve ser medida nas condições normais de temperatura e usando um método que elimine os harmônicos.

A precisão do método de medição e a correlação com os valores medidos com tensão e frequência nominais devem ser fornecidos pelo fabricante [4].

9.1.3 - ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

O capacitor deve ser capaz de suportar sem ocorrer nenhuma perfuração ou descarga, durante um intervalo de tempo a determinadas tensões de ensaio, entre terminais e entre os terminais interligados e a caixa.

9.1.3.1- ENSAIO DE TENSÃO APLICADA ENTRE TERMINAIS

Cada capacitor deve suportar, durante 10 [s], uma tensão contínua igual a 4,3 U_N ou tensão alternada de 2,15 U_N o mais próximo possível da frequência nominal.

onde:

U_N - Tensão nominal do capacitor (valor eficaz).

No ensaio de tensão contínua, as correntes de cargas e descargas devem ser limitadas a 10 vezes o valor da corrente nominal durante 10 [s] [8].

Caso o capacitor possua fusível interno, deve-se realizar medições de capacitância para que se possa identificar a operação de algum fusível [4].

9.1.3.2- ENSAIO DE TENSÃO APLICADA ENTRE TERMINAIS E CAIXA

A tensão alternada deve ter frequência próxima à nominal e de valor correspondente à referência de isolamento da unidade [8].

As unidades capacitivas que possuem todos os terminais isolados, devem suportar durante 10 [s] uma tensão alternada aplicada entre os terminais de linha (ligados entre si) e a caixa. O valor da tensão de ensaio é referente ao isolamento da unidade [4].

O ensaio deve ser executado, mesmo se um dos terminais for previsto para ser ligado à caixa. Mas se a unidade contém um terminal permanentemente ligado à caixa, não deve ser submetido o ensaio [4].

Durante o ensaio não deve haver nenhuma perfuração ou descarga.

9.1.4 - ENSAIO DE ESTANQUEIDADE

Cada unidade capacitiva é submetida a aquecimento em estufa, a fim de se verificar, com a dilatação térmica do líquido impregnante, se não há vazamentos.

As unidades capacitivas do tipo só-filme devem ser aquecidas de modo que todas as partes atinjam uma temperatura média de 75° [C] com variação máxima de ± 5° [C] [4].

Para capacitores com dielétrico misto (papel-filme) a temperatura de ensaio deve ser de 90° [C] [4].

Conforme [8], os capacitores devem permanecer à temperatura de 90° [C] com variação máxima de ± 5° [C].

Todos os ensaios devem possui temperaturas indicadas por um intervalo de pelo menos 6 horas.

9.1.5- ENSAIO DO DISPOSITIVO DE DESCARGA

O dispositivo de descarga, se houver, e se for uma resistência, deve ser medida sua resistência ôhmica, a fim de verificar os tempos estabelecidos para a descarga do capacitor. O método de ensaio pode ser selecionado pelo fabricante e o ensaio deve ser realizado após o ensaio de tensão aplicada [4].

9.2- ENSAIOS DE TIPO

Os ensaios de tipo são efetuados com o objetivo de verificar se o projeto dos capacitores atendem as características especificadas, bem como as exigências operacionais das normas. Salvo especificações em contrário, cada amostra de capacitores a ser submetida a ensaios de tipo, deve antes satisfazer a todos os ensaios de rotina.

Os ensaios de tipo devem ser realizados em amostra de capacitores retirada do lote recomendado.

Na maioria dos casos, não é essencial que todos os ensaios sejam efetuados no mesmo capacitor, podendo ser efetuados em diversas unidades capacitivas com as mesmas características.

A realização dos ensaios de tipo é de responsabilidade do fabricante. Se solicitado, o fabricante deve fornecer o relatório detalhado dos ensaios.

Nos ensaios de tipo, todos os ensaios de rotina devem ser realizados.

9.2.1- ENSAIO DE ESTABILIDADES TÉRMICA

O capacitor protótipo é submetido a determinadas condições de temperatura (dentro de estufa) e ventilação. Este ensaio visa determinar o comportamento do capacitor em condições de operação adversas.

A temperatura ambiente, dentro da estufa de ensaio, deve ser mantida dentro dos limites especificados nas tabelas 18 e 19. A temperatura ambiente possui uma tolerância de ±2°C.

LIMITE SUPERIOR DA CATEGORIA DE TEMPERATURA [°C]	TEMPERATURA AMBIENTE INTERNA DA ESTUFA [°C]
40	31
45	41
50	46

TABELA 18 - TABELA DOS LIMITES DE TEMPERATURA [8]

LETRA	TEMPERATURA DO AR AMBIENTE EM °C
A	40
B	45
C	50
D	55

TABELA 19 - LIMITE DA TEMPERATURA AMBIENTE [4]

Os capacitores devem ser submetidos a uma tensão praticamente senoidal, de frequência industrial nominal, até estabilizarem ou ocorrer a perfuração.

Conforme [8], durante as últimas 24 horas, a cada 2 horas deve-se medir a tangente do ângulo de perdas, e a temperatura não deverá sofrer variações superiores a 3° [C].

Conforme [8], a capacitância deve ser medida antes e depois dos ensaios, nas condições normais de temperatura, sendo que a diferença da temperatura do capacitor nas duas medidas não deverá ser superior a 5° [C], e a variação da capacitância deverá ser inferior a 2%.

A tensão de ensaio é dada pela equação 15 [8]:

$$U_E = 1,1.U_N\sqrt{\frac{W_F}{W_R}} \qquad (15)$$

onde:

U_E - Tensão de ensaio;
U_N - Tensão nominal do capacitor;
W_F - Perda máxima em watts;
W_R - Perda real em watts do capacitor de ensaio.

Conforme [4], para a realização do ensaio devem ser escolhidos três capacitores que apresentarem o maior fator de perdas e dentre estes escolher para ensaio o que possui o maior fator de perdas. O conjunto deve ser montado em uma estufa sem circulação de ar e na posição vertical.

O capacitor sob ensaio deve ser submetido por um período, pelo menos, de 48 horas a uma tensão alternada de forma aproximadamente senoidal. O valor da tensão deve ser mantido constante durante o ensaio [4].

Este valor é calculado através da equação 16 [4]:

$$U_E = 1,2\sqrt{\frac{Q_N}{2.\pi.f.C}} \qquad (16)$$

onde:

U_E - Tensão de ensaio em [V];
Q_N - Potência reativa nominal da unidade em [VAr];
f - Frequência de ensaio em [Hz];
C - Valor da capacitância medida em [F].

A precisão medida da temperatura deve ser, no mínimo, ±5° [C]. Durante as últimas 6 horas, o capacitor deve ser medido 4 vezes, e a diferença de temperatura entre o capacitor e o ambiente não deve exceder 1° [C] [4].

Durante toda a duração do ensaio, a temperatura ambiente deve ser verificada, por meio de um termômetro (de bulbo ou termopar), retardado, de modo a ter uma constante de tempo aproximadamente de uma hora.

9.2.2- ENSAIO DO FATOR DE PERDAS À TEMPERATURA ELEVADA

O fator de perdas deve ser medido no final do ensaio de estabilidade térmica. A tensão do ensaio deve ser a de estabilidade térmica. O valor acordado entre o fabricante e o comprador não deve ser excedido.

9.2.3- ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

A tensão de ensaio entre terminais e a caixa é realizado entre todas as unidades capacitoras que tenham seus terminais isolados da caixa, devem suportar durante 1 [min] uma tensão alternada aplicada entre os terminais de linha e a caixa, de valor correspondente a sua isolação. O ensaio entre terminais tem duração de 1 [min], com uma tensão contínua igual a 4,3 U_0 ou tensão alternada de 2,15 U_0 [8]. O valor de U_0 é portanto dado por:

$$U_0 = 2.U_N / \sqrt{3}$$

onde:

U_N - Tensão nominal do capacitor.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MACÁ
BIM

Unidades com terminais isolados da caixa devem ser submetidos durante 1 minuto às tensões de ensaio conforme os níveis de isolamento [4].

O ensaio deve ser a seco em unidades para uso interno e sob chuva artificial, em unidades para uso externo [4].

A posição das buchas no ensaio sob chuva artificial deve ser a mesma de operação [4].

Durante o ensaio não pode acorrer perfuração da isolação ou descarga disruptiva externa.

9.2.4- ENSAIO DE IMPULSO

A isolação do capacitor é comprovada através da aplicação de uma ou mais ondas de impulso de tensão normalizadas com referência ao isolamento da unidade, nenhuma descarga deve ocorrer.

É aplicados, entre os terminais ligados entre si e a caixa, 5 (cinco) impulsos de cada polaridade, não devendo ocorrer nenhuma descarga externa ou perfuração (descarga interna).

No caso de ocorrer a perfuração (descarga interna) a unidade é considerada reprovada ou se ocorrer mais de uma descarga na série com impulsos de mesma

polaridade, a unidade é reprovada, mas se ocorrer uma descarga em série de cinco impulsos, deve-se aplicar mais dez impulsos, e se não ocorrer nenhuma descarga externa, a unidade será aprovada.

Caso ocorra uma ou mais descarga na série de dez impulsos, o ensaio deve ser realizado em uma unidade com correção da tensão de ensaio. Devido às condições ambiente, aplicam-se 5 (cinco) novos impulsos de cada polaridade e é considerada reprovada se ocorrer uma descarga interna ou duas descargas externas para uma mesma polaridade. No caso de ocorrência de uma descarga externa com uma mesma polaridade, devem ser aplicados, adicionalmente, dez novos impulsos na mesma polaridade e será aprovada caso nenhuma descarga ocorrer [4].

Caso ocorra uma ou mais descarga na série de dez impulsos, pode-se efetuar um reforço na isolação externa, a critério do fabricante, e deve-se aplicar 5 (cinco impulsos) de cada polaridade e não deve ocorrer nenhuma descarga para a unidade ser considerada aprovada [4].

O ensaio de impulso não é aplicada às unidades que possuem terminal permanente ligado à caixa, e às unidades não previstas para instalação exposta ao tempo [8].

9.2.5- ENSAIO DE DESCARGA

O capacitor é carregado com tensão contínua e desligado, então mede-se o tempo de descarga, a fim de verificar a atuação do dispositivo de descarga.

A unidade deve ser carregada em uma tensão contínua com duas vezes o valor eficaz da tensão terminal conforme [8] e duas vezes e meio conforme [4], e depois descarregada de uma só vez, através de um descarregador localizado o mais próximo possível do capacitor.

Devem ser feitas 5 (cinco) descargas no intervalo de tempo de 10 minutos.

A capacitância deve ser medida antes e depois do ensaio e a diferença entre as medições deve ser menor que o valor da variação da capacitância devido a ruptura de um elemento ou a operação de um fusível interno [4].

A capacitância medida antes e depois do ensaio, não deve variar mais que 2% [8].

9.2.6- ENSAIO DE TENSÃO RESIDUAL

O capacitor, possuindo dispositivo interno de descarga, deve ser energizado com uma tensão contínua de $\sqrt{2}U_N$, conforme [8] e deve reduzir a tensão residual até 50 [V] ou menos, em até o intervalo de tempo de 1 [min] para capacitores com tensão nominal até 1000 [V].

9.2.7- ENSAIO DE IONIZAÇÃO

Este ensaio serve para comprovar o nível de ionização no dielétrico da unidade capacitiva quando submetido a várias aplicações de tensão com tempos e valores diferentes, daí determinar o nível de descargas parciais no referido dielétrico.

As tensões aplicadas durante o ensaio devem ser praticamente senoidais e aproximadamente à frequência nominal do capacitor. O circuito de ensaio deve ser suficientemente amortecido, para que as sobretensões devidas aos fenômenos transitórios sejam reduzidas ao mínimo possível.

A tensão nominal é aplicada ao capacitor, por um tempo suficiente para que ele atinja o equilíbrio térmico.

Posteriormente um ensaio de tensão aplicada, deve ser feito durante 1 [s], cujo valor será objeto de acordo entre fabricante e comprador. Em seguida, a tensão deve ser reduzida a 1,2 vezes a corrente nominal e mantida por um período de 10 [min], depois a tensão é aumentada para 1,5 vezes a corrente nominal e mantida por um período de 10 [min]. Não se deve observar nos últimos 10 [min] nenhum aumento do nível de ionização.

9.2.8- ENSAIOS DE RÁDIO-RUÍDO

O capacitor é submetido a condições de tensões especificadas [8], e mede-se a tensão de rádio-interferência, a qual não pode ultrapassar os limites estabelecidos.

As unidades capacitivas devem ser ensaiadas com 115% da tensão nominal.

Destina-se a comprovar que à frequência de 1 [MHz], não deve exceder a 250 [μV] a todas as unidades com tensão nominal de 15 [kV] ou menos.

9.2.9 - ENSAIO DE REGENERAÇÃO

O capacitor quando auto-regenerativo deve ser submetido durante 10 [s] a uma tensão alternada de 2,15 U_N ou a uma tensão contínua de 4,3 U_N (escolha fica a critério do fabricante) [8].

Se ocorrerem menos que 5 (cinco) descargas durante este tempo, deve-se aumentar lentamente a tensão, até ocorrerem 5 (cinco) descargas desde o início de ensaio.

Em seguida, é diminuída para 0,8 vezes o valor inicial (isto é, 1,72 U_N para o ensaio em tensão alternada, e 3,44 U_N para o ensaio em corrente contínua) e mantida por 10 [s]. Não deve ocorrer nenhuma descarga durante este tempo.

9.2.10- ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

O capacitor é submetido a uma tensão de ensaio durante um certo tempo, com a finalidade de verificar a rigidez dielétrica [8].

O capacitor deve suportar, durante 10 [s], a tensão contínua igual a 4,3 vezes a tensão nominal inferior e igual a 1000 [V] e 6,25 vezes a tensão nominal para capacitores de tensão acima de 1000 [V] [8].

CAPÍTULO II

POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA

POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA

1- INTRODUÇÃO [1]

Determinados conceitos na área técnica são puramente matemáticos e criados com a finalidade de permitir uma análise de forma mais simples de um fenômeno físico. Isto ocorre nas grandezas que serão analisadas neste capítulo, e que são fundamentais para a solução dos problemas referentes a compensação do fator de potência.

Tanto a potência ativa, quanto a potência reativa e o fator de potência são grandezas resultantes de definições, e portanto, puramente matemáticas e, a seguir será feita uma análise das mesmas.

2- SISTEMAS PURAMENTE SENOIDAIS

Será feito primeiramente uma análise da potência ativa, reativa e fator de potência para sistemas elétricos operando em sistemas elétricos sujeito a ondas de tensão e corrente senoidais, em outras palavras admite-se que a fonte de tensão existente no circuito elétrico é senoidal e as cargas lineares.

2.1- POTÊNCIA ATIVA [1]

Tome-se como exemplo um circuito elétrico, no qual uma fonte alimenta uma resistência, conforme mostra a figura 1. A corrente elétrica que se estabelece no circuito é diretamente proporcional à diferença de potencial da fonte. A constante de proporcionalidade é denominada de resistência elétrica (que pode ser admitida constante, na medida em que se despreze a variação da mesma com a temperatura).

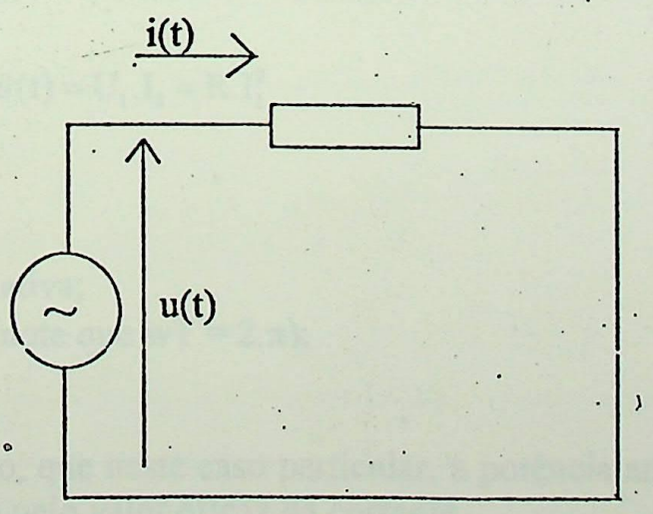


FIGURA 1- CIRCUITO RESISTIVO

$$u(t) = \sqrt{2}.U_1.\cos wt \quad (1)$$

e

$$i(t) = \sqrt{2}.I_1.\cos wt \quad (2)$$

onde:

$$I_1 = \left(\frac{U_1}{R}\right) \quad (3)$$

para:

- u(t) - Valor instantâneo da tensão do circuito;
- i(t) - Valor instantâneo da corrente do circuito;
- R - Resistência elétrica do circuito;
- U_1 - Valor eficaz da tensão do circuito na frequência fundamental;
- I_1 - Valor eficaz da corrente do circuito na frequência fundamental;
- w - Frequência angular ($w = 2.\pi.f$ [rad/s])

A corrente que circula pela resistência provoca na mesma uma elevação de temperatura (mensurável), que é diretamente proporcional ao quadrado do valor eficaz da corrente e ao valor da resistência.

$$\Delta\tau = K_\tau.R.I^2 \quad (4)$$

onde:

- $\Delta\tau$ - Elevação de temperatura;
- K_τ - Constante de proporcionalidade (válida para regime permanente).

A potência ativa (média, útil ou eficaz) em um circuito elétrico qualquer é o valor médio do produto dos valores instantâneos de tensão pela corrente, como mostra a equação (5).

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).d(t) = U_1.I_1 = R.I_1^2 \quad (5)$$

onde em (5), tem-se:

- P - Potência ativa;
- T - Período (note que $wT = 2.\pi$);

Verifica-se então, que neste caso particular, a potência ativa é o produto do valor eficaz da tensão pelo valor eficaz da corrente.

No circuito indicado na figura 2 , tem-se uma indutância L em série com uma resistência. É importante lembrar que a indutância é definida a partir da lei de Lenz, ou seja, a circulação de corrente pelo circuito produz uma diferença de potencial, onde se estabelece um campo eletromagnético que pode ser quantificado através da denominada força magnetomotriz, a qual é dada por:

$$f_{MM} = N.i \tag{6}$$

onde:

f_{MM} - Valor instantâneo da força magnetomotriz;
N - Número de espiras do condutor no circuito;
i - Valor instantâneo da corrente.

A força magnetomotriz vai dar origem a um fluxo magnético, definido por:

$$\phi = \frac{f_{MM}}{R_M} \tag{7}$$

e o valor de R_M é expresso de acordo com os parâmetros da bobina.

$$R_M = \frac{l}{\mu.S} \tag{8}$$

onde:

R_M - Relutância do circuito magnético;
ϕ - Valor instantâneo do fluxo;
l - Comprimento do circuito magnético;
S - Seção do circuito magnético;
μ - Permeabilidade magnética.

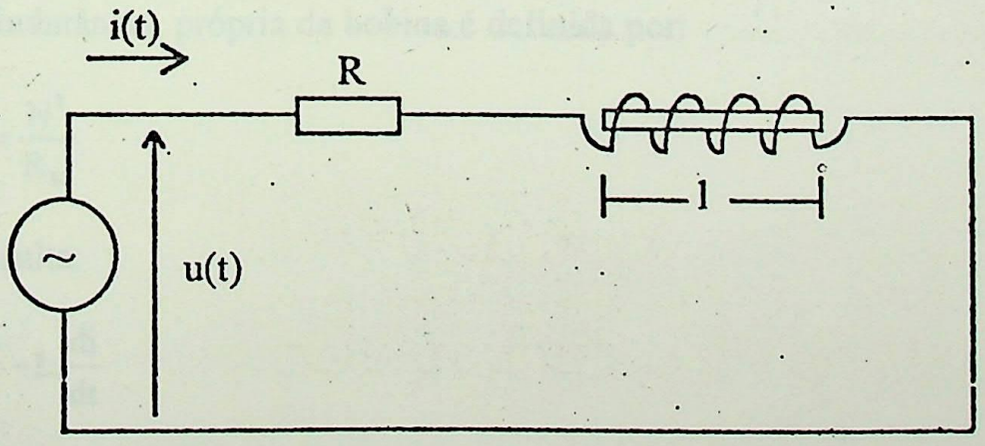


FIGURA 2- CIRCUITO RESISTIVO-INDUTIVO

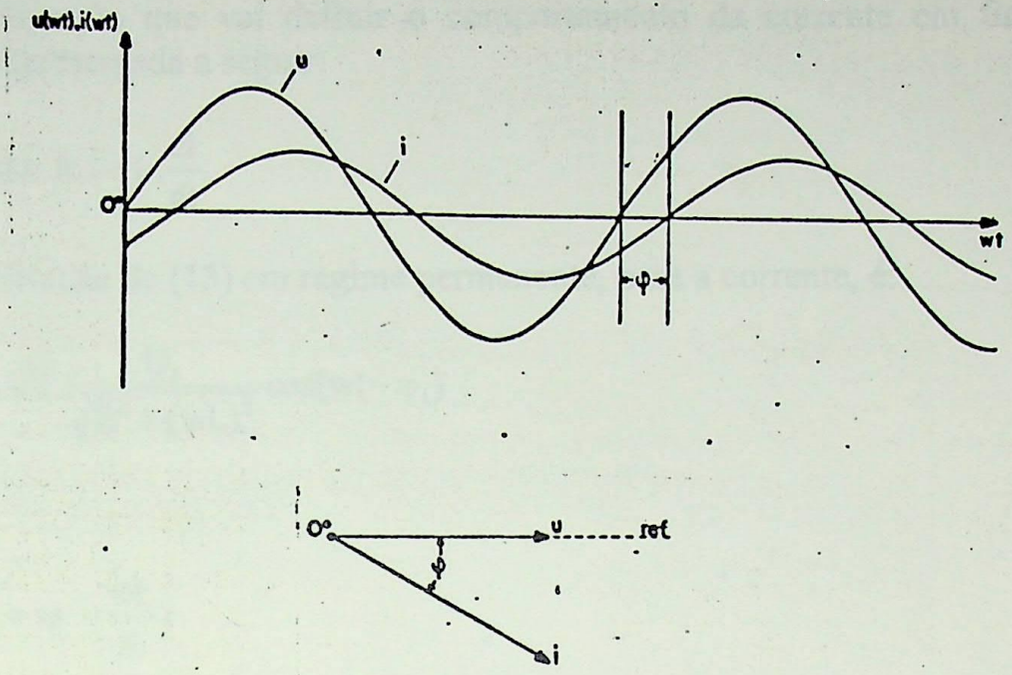


FIGURA 3- FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE PARA O CIRCUITO DA FIGURA 2

Se a corrente é variável no tempo, para o circuito da figura 2, o fluxo magnético ϕ na bobina também será variável, consequentemente nesta, aparecerá uma força eletromotriz definida por:

$$e = -N.\frac{d\phi}{dt} \qquad (9)$$

considerando-se as equações anteriores, resulta:

$$e = -\frac{N^2}{R_M}.\frac{di}{dt} \qquad (10)$$

A indutância própria da bobina é definida por:

$$L = \frac{N^2}{R_M} \qquad (11)$$

assim resulta:

$$e = -L.\frac{di}{dt} \qquad (12)$$

onde:

e - Força eletromotriz induzida no circuito;
L - Indutância própria da bobina.

A equação que vai definir o comportamento da corrente em função do tempo é apresentada a seguir:

$$u(t) = R.i + L.\frac{di}{dt} \qquad (13)$$

A solução de (13) em regime permanente, para a corrente, é:

$$i = \sqrt{2}.\frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (wL)^2}}\cos(wt - \varphi_1) \qquad (14)$$

sendo:

$$\varphi_1 = tg^{-1}(\frac{wL}{R}) \qquad (15)$$

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (wL)^2}} \qquad (16)$$

φ_1 - Ângulo de deslocamento da corrente em relação a tensão na frequência fundamental.

Do mesmo modo que no caso do circuito puramente resistivo, a elevação de temperatura no resistor é diretamente proporcional ao quadrado do valor eficaz da corrente e a resistência.

$$\Delta\tau = K_\tau.R.I^2 \qquad (17)$$

Verifica-se, neste caso, que para uma mesma tensão de alimentação e mesma resistência, o valor eficaz da corrente será menor quanto maior for a parcela wL, ou ainda, quanto maior for o ângulo de deslocamento da corrente em relação à tensão, (vide figura 4, anexo 4), para dois casos onde os valores de L são diferentes.

Para um circuito do tipo apresentado nas figuras 2 e para as formas de ondas da figura 4, tem-se:

$$u(t) = \sqrt{2}.U_1.\cos(wt - \varphi_u) \qquad (18)$$

$$i(t) = \sqrt{2}.I_1.\cos(wt - \varphi_i) \qquad (19)$$

Substituindo-se as equações (18) e (19) na equação (5), tem-se:

$$P = \frac{1}{T}.\int_0^T [(\sqrt{2}.U_1.\cos(wt - \varphi_{u1})).(\sqrt{2}.I_1.\cos(wt - \varphi_{i1}))].d(t) \qquad (20)$$

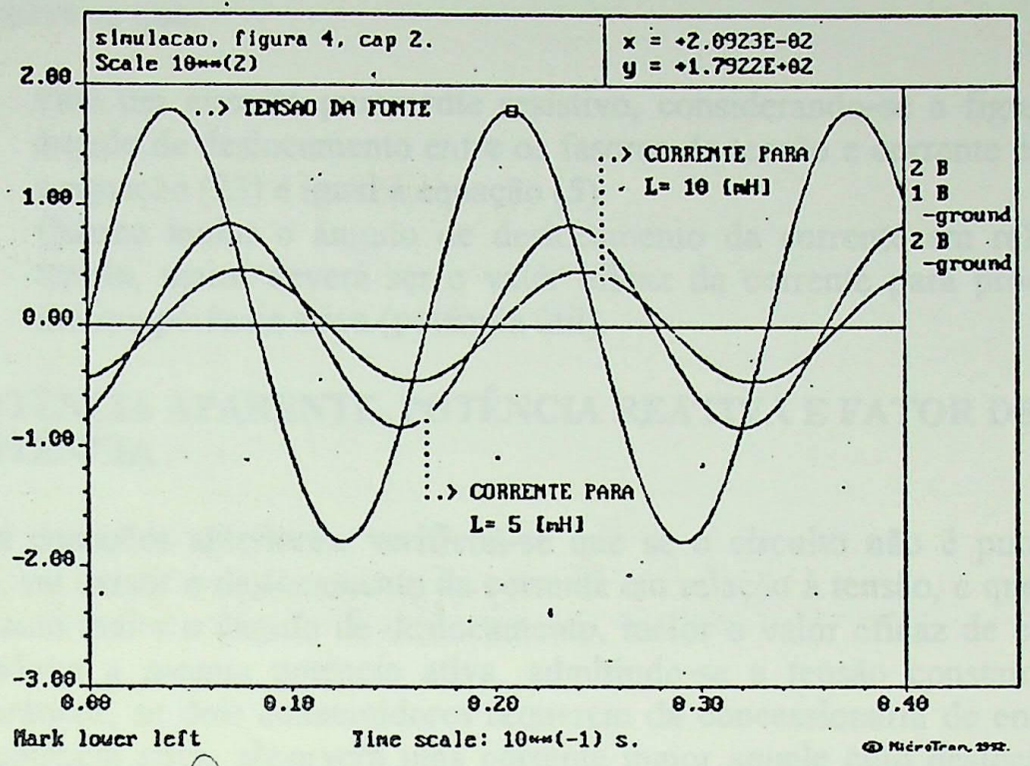


FIGURA 4- SIMULAÇÃO MOSTRANDO O DEFASAMENTO DA CORRENTE COM RELAÇÃO À TENSÃO COM DIFERENTES VALORES DE wL PARA O CIRCUITO DA FIGURA 2

rescrevendo a equação (20):

$$P = \frac{1}{T}\left[\int_0^T [U_1.I_1.\cos(\varphi_{u1} - \varphi_{i1})].d(wt) + \int_0^T [U_1.I_1.\cos(2wt - \varphi_{u1} - \varphi_{i1})].d(t)\right] \quad (21)$$

Definindo-se:

$$\varphi_1 = \varphi_{u1} - \varphi_{i1} \quad (22)$$

onde:

- φ_1 - Ângulo de deslocamento da corrente em relação à tensão na frequência fundamental;
- φ_{u1} - Ângulo de deslocamento do fasor tensão na frequência fundamental;
- φ_{i1} - Ângulo de deslocamento da fasor corrente na frequência fundamental.

Uma vez que o valor médio do segundo termo do segundo membro da equação (21) é nulo, tem-se:

$$P = U_1.I_1.\cos\varphi_1 \quad (23)$$

onde para as equações anteriores:

- P - Potência ativa na frequência fundamental;
- $\cos\varphi_1$ - Fator de deslocamento.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Observa-se que:

* Para um circuito puramente resistivo, considerando-se a figura 1, o ângulo de deslocamento entre os fasores de tensão e corrente é nulo e a equação (23) é igual à equação (5).
* Quanto maior o ângulo de deslocamento da corrente em relação à tensão, maior deverá ser o valor eficaz da corrente para produzir a mesma potência ativa (potência útil).

3- POTÊNCIA APARENTE, POTÊNCIA REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA

Das equações anteriores, verificou-se que se o circuito não é puramente resistivo, vai existir o deslocamento da corrente em relação à tensão, e que, neste caso, quanto maior o ângulo de deslocamento, maior o valor eficaz de corrente para produzir a mesma potência ativa, admitindo-se a tensão constante. Em termos práticos, se dois consumidores requerem da concessionária de energia a mesma potência ativa, absorverá uma corrente maior aquele cujo deslocamento da corrente em relação à tensão for maior.

Considerando as funções que definem corrente e tensão, tem-se que a potência aparente (S) como sendo o produto do valor eficaz da tensão pelo valor eficaz da corrente.

$$S = U_{RMS} . I_{RMS} \qquad (24)$$

onde:

S - Potência aparente;
U_{RMS} - Valor eficaz da tensão;
I_{RMS} - Valor eficaz da corrente.

Para quantificar a diferença do deslocamento da corrente com a tensão dos consumidores perante a concessionária, foi definido o "fator de potência", que relaciona a potência ativa com os "volt-amperes" necessários para produzí-la (potência aparente), como mostra a equação (25).

$$FP = \frac{P}{S} \qquad (25)$$

onde:

FP - Fator de potência;
P - Potência ativa.

Como a tensão e a corrente possuem o comportamento definido por uma função puramente senoidal os valores de U_{RMS} e U_1 são iguais, bem como I_{RMS} e I_1. Logo neste caso será:

$$S = U_1 . I_1 \qquad (26)$$

e considerando as equações (23) e (26) na equação (25), resulta:

$$FP = \frac{U_1.I_1.\cos\varphi_1}{U_1.I_1} = \cos\varphi_1 \qquad (27)$$

Ou seja, o fator de potência é, numericamente, igual ao fator de deslocamento em situações puramente senoidais. Quanto maior o ângulo de deslocamento, menor o fator de deslocamento e, neste caso, menor o fator de potência. Isto significa que para uma determinada carga de potência P, quanto maior o ângulo de deslocamento maior será a corrente através do circuito alimentador para suprir a carga referida. Pode-se concluir que, sendo o fator de potência unitário (a eficiência do processo de transmissão de energia será 100%), e portanto a potência ativa trasmitida é igual a potência aparente.

A diferença entre as potências aparente e reativa pode ser definida matematicamente, pela a equação (28), no caso de situações puramente senoidais.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \qquad (28)$$

A grandeza Q, definida matematicamente, é denominada de potência reativa.

4- SISTEMAS NÃO-SENOIDAIS [67]

A conceituação de potência ativa, reativa e fator de potência nos itens anteriores estabelecidos para circuitos elétricos na presença de ondas de tensão e corrente senoidais e cargas lineares. Nos casos onde existam cargas não-lineares e ou mesmo alimentação com ondas de tensão não senoidal os conceitos anteriores deverão ser completados.

Este tipo de análise é importante, uma vez que torna-se cada vez mais comum em instalações industriais a utilização de equipamentos que distorcem as formas de onda da corrente e da tensão.

Serão estudado dois casos com sistemas não-senoidais: o primeiro, fonte de tensão puramente senoidal em regime estacionário e cargas com harmônicos de corrente, e o segundo fonte de tensão contendo harmônicos e cargas que distorcem as ondas de resultantes em regime estacionário.

4.1- FONTE DE TENSÃO SENOIDAL EM REGIME ESTACIONÁRIO E CARGAS COM HARMÔNICOS DE CORRENTE

As equações que definem a tensão e a corrente do sistema elétrico em análise estão indicadas a seguir :

$$u(t) = \sqrt{2}.U_1.\mathrm{sen}(wt) \qquad (29)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}.I_n.\cos(nwt - \varphi_n). \qquad (30)$$

onde:

- u - Valor instantâneo da tensão;
- φ_u - Ângulo de deslocamento do fasor de tensão na frequência fundamental;
- i - Valor instantâneo da corrente;
- n - Ordem do harmônico;
- I_n - Valor eficaz do harmônico de corrente;
- φ_n - Ângulo de deslocamento do fasor de corrente.

OBSERVAÇÃO: Neste caso só tem sentido definir-se o ângulo de deslocamento do componente fundamental da corrente, uma vez que a tensão apenas existe na frequência fundamental.

Observe, que na equação (30) a corrente de comportamento não senoidal foi representada pela série trigonométrica de Fourier, sendo que cada componente da série é denominado harmônico de corrente.

Neste caso, conforme pode ser matematicamente comprovado (uma vez que se tratam de grandezas puramente matemáticas) a potência ativa será dada apenas pelos componentes fundamentais da tensão e corrente e o ângulo de deslocamento na frequência fundamental.

$$P = U_1 . I_1 . \cos\varphi_1 \tag{31}$$

onde:

$$\varphi_1 = \varphi_{u1} - \varphi_{i1} \tag{32}$$

- φ_1 - Ângulo de deslocamento do componente fundamental da corrente em relação ao componente fundamental de tensão.

O valor eficaz da corrente pode ser calculado a partir da equação 33:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^3 \ldots} \tag{33}$$

onde, o fator de distorção da corrente é definido conforme [33], como sendo:

$$F_{di} = \frac{\sqrt{\sum_{\substack{n=0 \\ n\neq 1}}^{\infty} I_n^2}}{I_1} . 100 \tag{34}$$

onde:

- F_{di} - Fator de distorção da corrente.

A potência aparente, ou seja os "volts-amperes" necessários para produzir a potência ativa, será dado por:

$$S = U_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (I_n)^2} \qquad (35)$$

Define-se a potência reativa, na frequência fundamental (Q_1) como sendo:

$$Q_1 \overset{\Delta}{=} U_1 . I_1 . \operatorname{sen} \varphi_1 \qquad (36)$$

e a "potência devido aos harmônicos":

$$H \overset{\Delta}{=} U_1 \cdot \sqrt{I_0^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots} \qquad (37)$$

a equação (35), pode então ser escrita:

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + H^2 \qquad (38)$$

A equação (38) pode ser representada, graficamente através do tetraedro de potências como mostra a figura 5 [67].

Assim na presença de harmônicos o fator de potência definido pela equação (25), pode ser rescrito a partir das equações (23) e (35), como sendo:

$$FP = \frac{U_1 . I_1 . \cos \varphi_1}{U_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (I_n)^2}} \qquad (39)$$

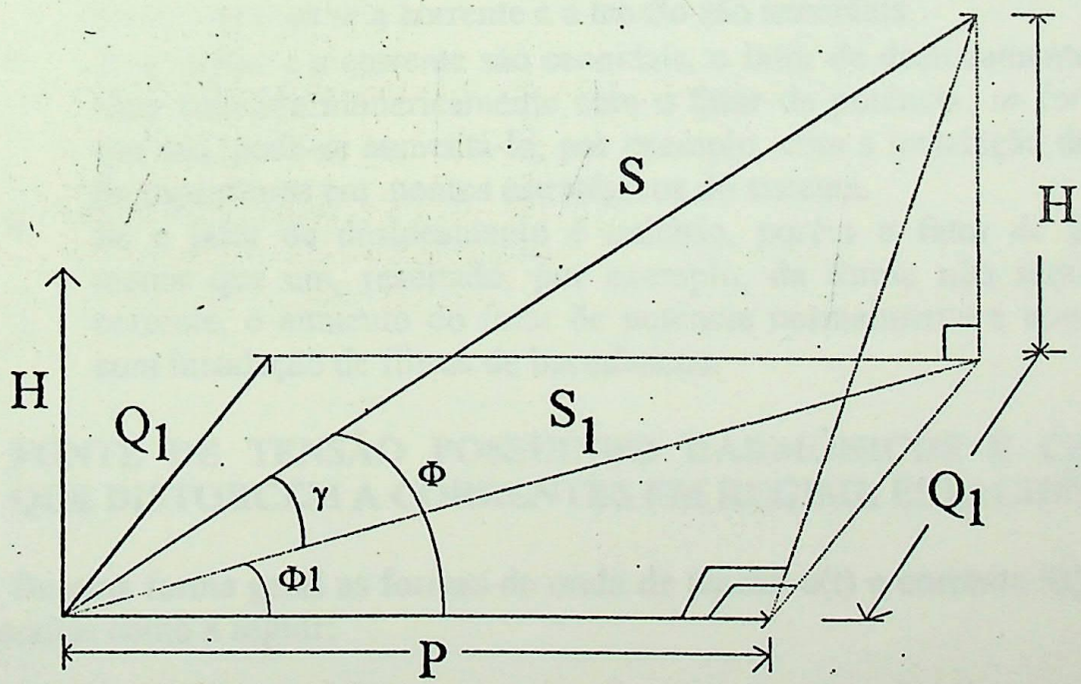


FIGURA 5- TETRAEDRO DE POTÊNCIA

Por outro lado a equação (39), pode ser reescrita em função do fator de distorção da corrente:

$$FP = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{\left(\frac{F_{di}}{100}\right)^2 + 1}} \qquad (40)$$

O fator de deslocamento ($\cos\varphi_1$) que aparece normalmente na literatura e que corresponde ao fator de potência convencional de sistemas onde são as ondas de tensão e corrente senoidais, pode ser chamado de fator de potência na frequência fundamental [67], pois só depende dos componente fundamentais das ondas finais de tensão e de corrente.

Conclui-se da equação (39):

* Se a forma de onda da tensão é senoidal, e da corrente, não senoidal, o fator de deslocamento refere-se apenas aos componentes fundamentais das ondas de tensão e corrente. O ângulo de deslocamento φ_1 representa o defasamento entre os componentes fundamentais de tensão e de corrente.
* Se os componentes fundamentais de corrente e tensão estão em fase, o fator de deslocamento nesta frequência ($\cos\varphi_1$) é unitário, porém não significando que o fator e potência seja também unitário.
* Se a forma de onda da corrente não for senoidal porém com características indutiva na frequência fundamental, o fator de potência será sempre menor que 1(um).
* Observa-se que o fator de potência é igual ao fator de deslocamento ($\cos\varphi_1$) apenas se a corrente e a tensão são senoidais.
* Se a tensão e a corrente são senoidais, o fator de deslocamento, neste caso coincide numericamente com o fator de potência, se for menor que um, pode-se aumentá-lo, por exemplo, com a instalação de banco de capacitores em pontos estratégicos do sistema.
* Se o fator de deslocamento é unitário, porém o fator de potência menor que um, resultado, por exemplo, da forma não senoidal da corrente, o aumento do fator de potência normalmente é conseguido com instalação de filtros de harmônicos.

4.2- FONTE DE TENSÃO POSSUINDO HARMÔNICOS E CARGAS QUE DISTORCEM A CORRENTES EM REGIME ESTACIONÁRIO

De uma forma geral as formas de onda de tensão u(t) e corrente i(t) podem ser escritas como a seguir:

$$u(t) = \sqrt{2}\sum_{n=0}^{\infty} U_n \operatorname{sen}(nwt + \varphi_{un}) \qquad (41)$$

$$i(t) = \sqrt{2}\sum_{n=0}^{\infty} I_n \operatorname{sen}(nwt + \varphi_{in}) \qquad (42)$$

onde:

U_n - Valor eficaz do harmônico de tensão de ordem n;
φ_{un} - Ângulo de fase do harmônico de tensão de ordem n no instante t=0;
φ_{in} - Ângulo de fase do harmônico de corrente de ordem n no instante t=0.

A potência média ativa P é dada por:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).d(t) \tag{43}$$

a partir das equações (41), (42) e (43), temos:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T \left\{\sqrt{2}.U_n.\text{sen}(nwt+\varphi_{un}).\sqrt{2}.I_n.\text{sen}(nwt+\varphi_{in})\right\}d(t) =$$
$$= U_n.I_n.\cos(\varphi_{un}-\varphi_{in}) \tag{44}$$

onde:

$$\varphi_n = \varphi_{un} - \varphi_{in} \tag{45}$$

assim resulta, que:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n.I_n.\cos\varphi_n \tag{46}$$

o valor eficaz da corrente é dado por:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^3 \ldots} \tag{47}$$

e o valor eficaz da tensão:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^3 \ldots} \tag{48}$$

logo a potência aparente pode ser dada por:

$$S = U.I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2}.\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} \tag{49}$$

definindo-se a potência reativa [67]:

$$Q_n = \sum_{n=0}^{\infty} U_n.I_n.\text{sen}\,\varphi_n \tag{50}$$

o fator de potência pode ser dado por:

$$FP = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n . I_n . \cos\varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}} = \cos\phi \qquad (51)$$

O tetraedro de potência neste caso, fica também estabelecido por:

$$S^2 = P^2 + Q_n^2 + H^2 \qquad (52)$$

sendo apresentado na figura 7.

A compensação da parcela Q_n pode ser conseguida, caso a fonte de alimentação fosse composta de fontes de harmônicos em série, através da colocação de capacitores ou indutores em paralelo com as fontes, a figura 6 ilustra esta idéia [67]. Como esta não é uma situação real, visto que a fonte de tensão é única, esta metodologia fica a nível teórico.

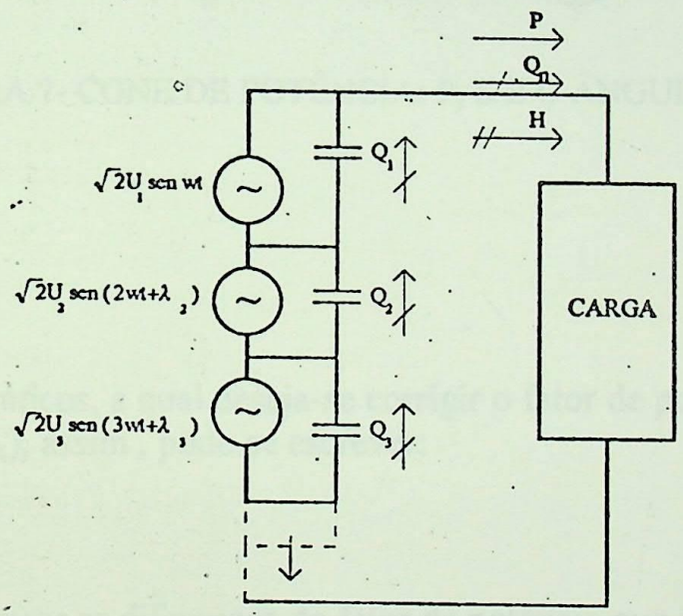


FIGURA 6- COMPENSAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA NO CASO DE FONTE DE TENSÃO COM COMPONENTES HARMÔNICOS

onde na figura 6, tem-se:

λ- ângulo de fase para o harmônico de tensão de ordem n em t=0.

4.3- CONE DE POTÊNCIAS

As aresta Q e H de cada decomposição são totalmente diferentes. Existem na verdade inúmeras formas de definir Q e H. No entanto se P e S forem constantes, o ângulo ϕ entre P e S será sempre o mesmo, podendo ser representado por um cone de potência (ver figura 7) [67].

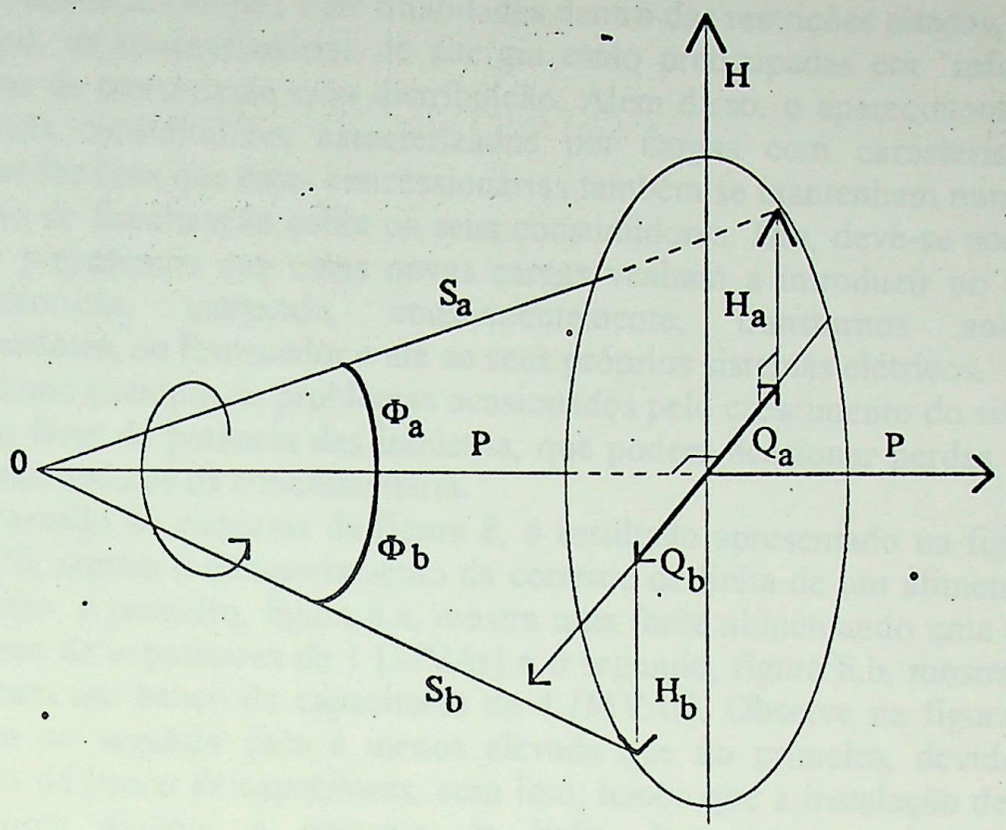


FIGURA 7- CONE DE POTÊNCIA: P, S E O ÂNGULO (ϕ) [67]

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

onde na figura 7:

$S_a = S_b$

$\phi_a = \phi_b$

Para fins práticos, a qual deseja-se corrigir o fator de potência na frequência fundamental (FP_1), assim , pode-se escrever:

$$FP_1 = \cos\varphi_1 \qquad (53)$$

Para compensar as diferenças do fator de potência que possam surgir devido aos harmônicos, deve-se corrigir o fator de potência acima do valor desejado. Assim no caso onde se desejar corrigir o fator de potência para 0,92, deve-se efetuar os calculos para 0,94 [1].

OBSERVAÇÃO:Atualmente as medições de harmônicos e potência são realizadas através de sistemas de aquisição de dados, que utilizam micro-computadores para armazenagem e tratamento matemático das informações

5- ASPECTOS GERAIS SOBRE O FATOR DE POTÊNCIA

O crescimento dos centros industriais se processa de maneira cada vez mais acelerada, e às vezes até desordenadamente. Isto acarreta também a necessidade de suprimento de energia elétrica a fim de atender às solicitações de demanda dentro dos limites bastante aceitáveis de segurança (confiabilidade) e qualidade.

É tentando cumprir suas finalidades dentro das restrições citadas, que a todo o tempo, as concessionárias de energia estão preocupadas em "reforçar" seus sistemas de transmissão e/ou distribuição. Além disso, o aparecimento contínuo de novos consumidores caracterizados por cargas com características mais diversas faz com que estas concessionárias também se mantenham num constante trabalho de fiscalização sobre os seus consumidores. Isto, deve-se aos possíveis efeitos prejudiciais que essas novas cargas venham a introduzir no sistema da concessionária, causando, consequentemente, transtornos aos demais consumidores, ao fornecedor e até ao seus próprios sistemas elétricos.

Como exemplo de problemas ocasionados pelo crescimento do sistema, está o baixo fator de potência das indústria, que podem ocasionar perdas excessivas nos alimentadores da concessionária.

Baseado no esquema da figura 8, o resultado apresentado na figura 9 (ver anexo 5), mostra o comportamento da corrente de linha de um alimentador para dois casos: o primeiro, figura 8.a, mostra uma fonte alimentando uma carga com um banco de capacitores de 1 [MVAr] e o segundo, figura 8.b, mostra a mesma carga com um banco de capacitores de 4 [MVAr]. Observe na figura 9 que, a corrente no segundo caso é menos elevada que no primeiro, devido a maior potência do banco de capacitores, com isso, temos que a instalação de banco de capacitores diminui a corrente de linha dos sistemas de alimentação, consequentemente produzindo menores perdas e queda de tensão.

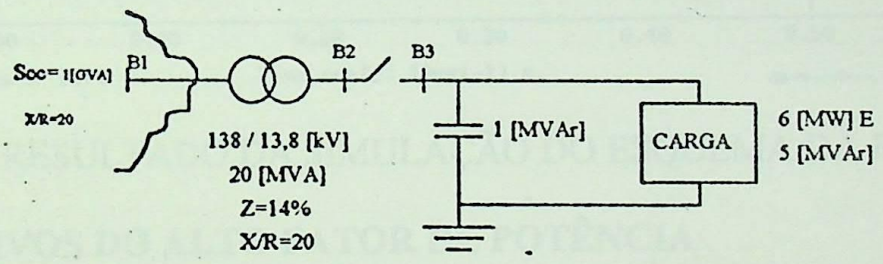


FIGURA 8.a

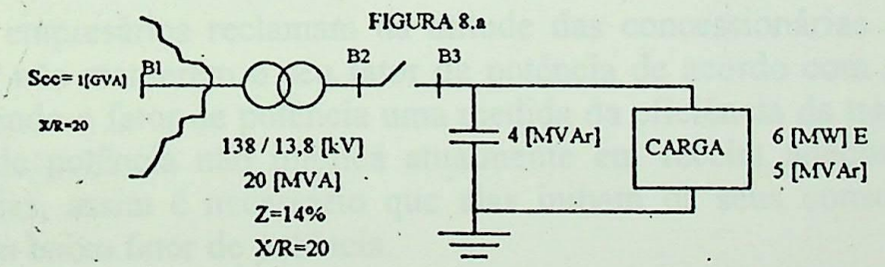


FIGURA 8.b

FIGURA 8- ESQUEMA DA SIMULAÇÃO DA FIGURA 9

As perdas em um sistema de transmissão é dado por:

$$P_e = R_{TH} . I^2 \qquad (54)$$

onde:

R_{TH} - Resistência equivalente de Thevenin;

I - Corrente no condutor;

P_e - Perdas no condutor.

Note pela figura 9 e equação (54) que, onde o fator de potência é maior, as perdas serão menores.

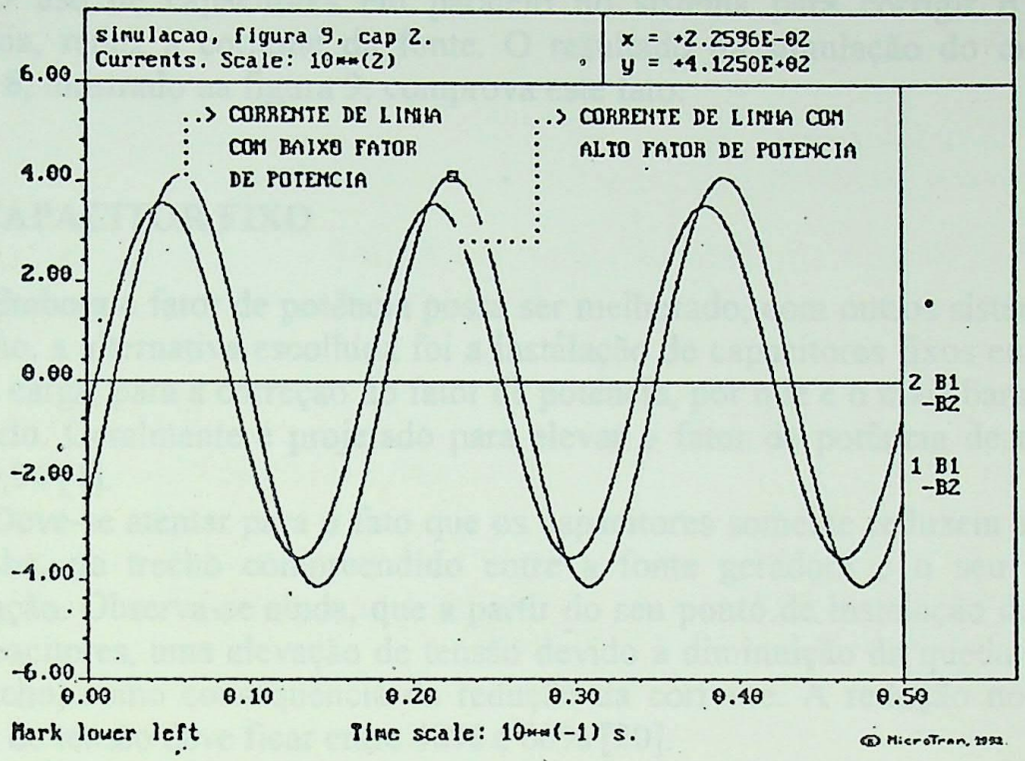


FIGURA 9- RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO ESQUEMA DA FIGURA 8

5.1- OBJETIVOS DO ALTO FATOR DE POTÊNCIA

Alguns empresários reclamam da atitude das concessionárias quando são multados por não manterem o seu fator de potência de acordo com a legislação atual, mas, sendo o fator de potência uma medida da eficiência da transmissão, o baixo fator de potência não implica atualmente em receita adequada para as concessionárias, assim é necessário que elas inibam os seus consumidores de operarem com baixo fator de potência.

Os principais fatores que fazem com que as concessionárias apliquem severas multas aos consumidores que não respeitarem os limites do fator de potência estabelecido por decreto são [3]:

* Redução da capacidade da potência instalada da fonte de suprimento de energia;
* Queda de tensão em circuitos de distribuição de energia elétrica;
* Aumento das perdas nas linhas de distribuição.

A operação com alto fator de potência:

1- Evitam-se multas;

2- Libera a capacidade (potência) das concessionárias (transformador, linhas ou geradores, etc.), permitindo ligação de novas cargas sem expansão dos circuitos alimentadores e distribuidores já existentes;
3- Diminuem as perdas na transmissão.

O uso de capacitores em paralelo no sistema para corrigir o fator de potência, reduz a corrente da fonte. O resultado da simulação do circuito da figura 8, mostrado na figura 9, comprova este fato.

5.2- CAPACITOR FIXO

Embora o fator de potência possa ser melhorado, com outros sistemas neste trabalho, a alternativa escolhida foi a instalação de capacitores fixos em paralelo com a carga, para a correção do fator de potência, por que é o mais barato e mais utilizado. Geralmente é projetado para elevar o fator de potência de referência para 0,94 [1].

Deve-se atentar para o fato que os capacitores somente reduzem a corrente de linha, no trecho compreendido entre a fonte geradora e o seu ponto de instalação. Observa-se ainda, que a partir do seu ponto de instalação dos bancos de capacitores, uma elevação de tensão devido à diminuição da queda de tensão no trecho, como consequência da redução da corrente. A redução no valor da queda de tensão deve ficar entre 40% a 60% [20].

Se houver uma carga variável, a eficiência prática do banco de capacitores é pequena; todavia o mesmo pode ser usado como compensador de base.

Um detalhe importante a considerar é a necessidade de se levar em conta os problemas de ressonância do capacitor com o restante do sistema. Isto será comentado nos próximos capítulos.

5.3- LOCALIZAÇÃO DOS CAPACITORES

Os pontos indicados para a localização dos capacitores em um sistema industrial são:

a- *No sistema primário*

Neste caso, os capacitores devem ser localizados após a medição no sentido da fonte para a carga. Em geral, o custo final de sua instalação, principalmente em subestações abrigadas, é superior a um banco equivalente, localizado no secundário do transformador. A grande desvantagem desta localização, é de não permitir a liberação da carga do transformador ou dos secundários da instalação consumidora. Assim sua função se restringe somente a correção do fator de potência e à liberação da carga da rede da concessionária. A figura 10, mostra a localização do banco de capacitores no sistema primário do transformador de potência da indústria.

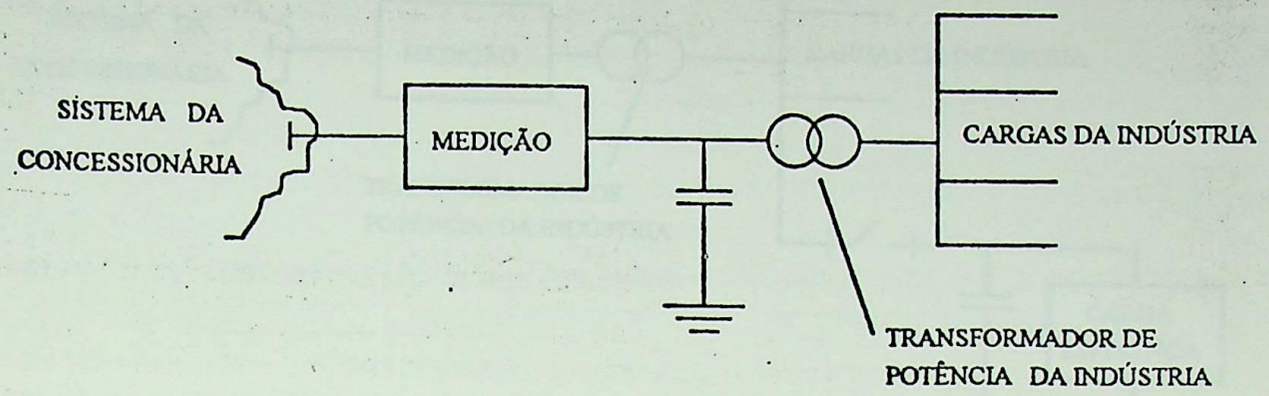


FIGURA 10- LOCALIZAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR DA INDÚSTRIA

b- *No secundário do transformador*

Neste caso, a localização dos capacitores geralmente ocorre no barramento de distribuição. Este tem sido uma prática comum, por resultar em geral em menores custos finais e maiores benefícios. Tem a vantagem de liberar a potência dos transformadores de potência e de poder instalar-se no interior da subestação. A figura 11 mostra a localização do banco de capacitores no sistema secundário do transformador de potência da indústria.

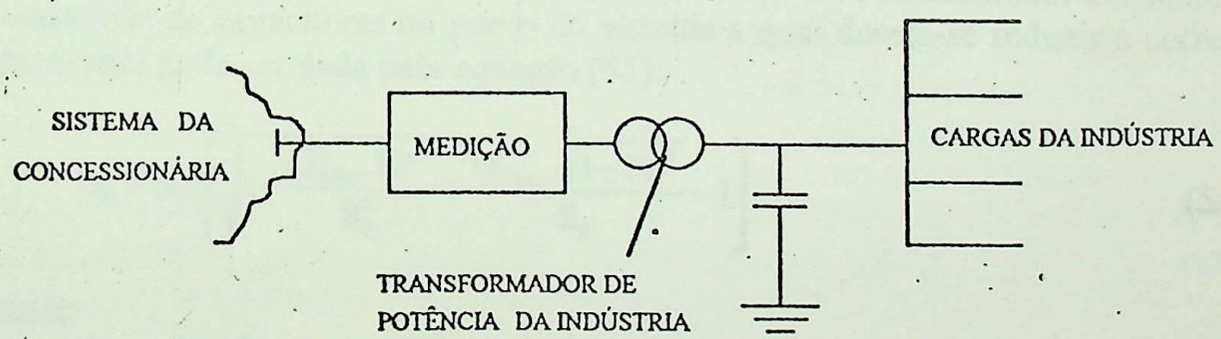


FIGURA 11- LOCALIZAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR DA INDÚSTRIA

c- *Junto a carga*

Quando uma carga específica possui um baixo fator de potência, como no caso de motores, pode-se fazer a sua correção, nos terminais da carga. Como ilustrado na figura 12.

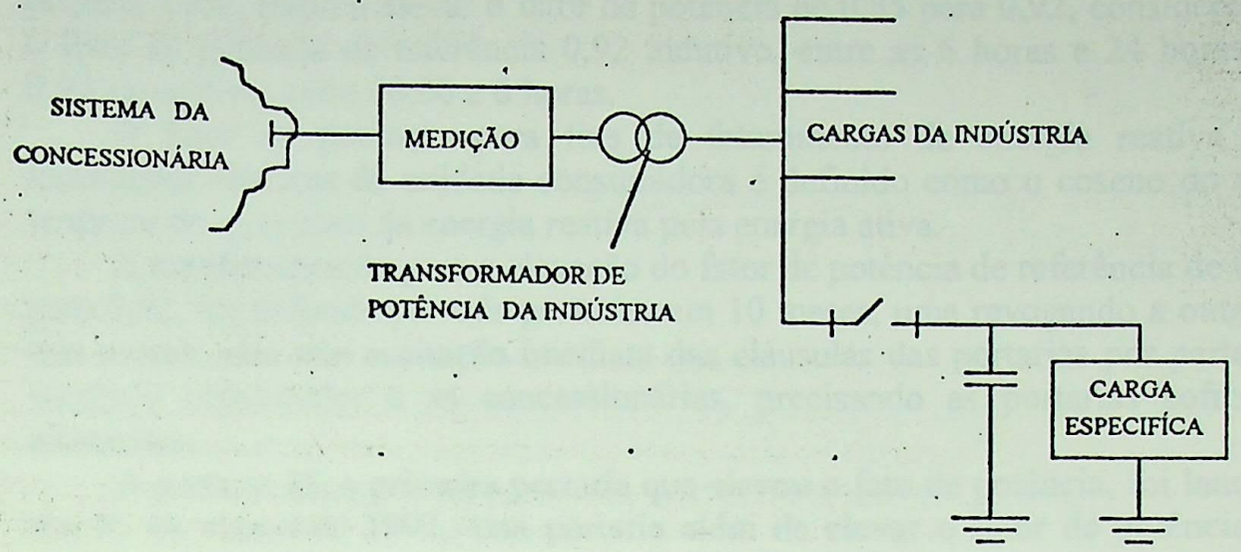


FIGURA 12- LOCALIZAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES NO PONTO DE CARGA ESPECÍFICA

5.4- APLICAÇÕES ESPECÍFICAS

5.4.1- *Liberação da capacidade de carga*

Quando os capacitores estão em operação num sistema, estes reduzem a corrente da fonte supridora de energia. Uma corrente menor significa menos potência aparente fornecida pelos seus transformadores principais, alimentadores ou circuitos de distribuição.

Muitas vezes é necessário inserir uma determinada carga em um ponto do sistema onde possuem consumidores de energia reativa, tendo-se um fator limitante a seção do condutor e a potência nominal do transformador existente. A instalação de capacitores no ponto do sistema a qual deseja-se reduzir a corrente fornecida pode ser dada pela equação (55):

$$S_L = S_F \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{Q_{NBC}^2 \cdot FP^2}{S_F^2}} + \frac{Q_{NBC} \cdot \sqrt{1 - FP^2}}{S_F} - 1 \right] \qquad (55)$$

onde:

S_L - Potência a ser liberado com a instalação de capacitores, em [kVA];
S_F - Potência fornecida antes da instalação dos capacitores, em [kVA];
FP - Fator de potência original;
Q_{NBC} - Potência nominal do banco de capacitores a ser instalado, em [kVAr].

6 -REGULAMENTAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Considerando a conveniência de promover um melhor aproveitamento da energia elétrica ofertada e, consequentemente, de reduzir as necessidades de investimentos para ampliação da capacidade do sistema elétrico Brasileiro, o DNAEE (Departamento Nacional de Água e Energias Elétrica) a partir da

portaria 1569, decidiu elevar o fator de potência de 0,85 para 0,92, considerando o fator de potência de referência 0,92 indutivo, entre as 6 horas e 24 horas ou 0,92 capacitivo, entre 00,00 e 6 horas.

O fator de potência para fins de faturamento de energia reativa das instalações elétricas da unidade consumidora é definido como o coseno do arco tangente do quociente da energia reativa pela energia ativa.

A regulamentação para a elevação do fator de potência de referência de 0,85 para 0,92, foi definida por três portarias em 10 meses, uma revogando a outra, o que mostra uma não aceitação imediata das cláusulas das portarias por parte do mercado consumidor e as concessionárias, precisando as portarias sofrerem alterações.

A portaria 85, a primeira portaria que elevou o fato de potência, foi lançada em 25 de março de 1992, essa portaria além de elevar o fator de potência de referência para 0,92 modificou a avaliação do fator de potência de referência que deveria ser calculado em intervalos integralizados de 1 hora ao invés de uma média mensal. Essa medida de alteração de como avaliar o consumo de energia reativa gerou um grau de insatisfação por parte do mercado consumidor e pelas concessionárias. Os consumidores reclamaram dos investimentos e do curto intervalo de tempo que teriam que realizar para adaptar-se às mudanças, a ordem de investimento devido a nova portaria é em torno de 1bilhão de dólares [51], já para as concessionárias os investimentos para a compra de registradores digitais alcançava cerca de 30 milhões de dólares [51]. Com estas dificuldades o DNAEE abriu negociações para alteração da portaria.

A portaria 613 de 9 de junho de 1993, devido as solicitações das dificuldades, concedeu um prazo adicional à adequação das instalaçãos, para abril de 1996.

Pela pressa com a qual foi redigida a portaria 613, esta deixou algumas dificuldades ainda, sendo a principal dificuldade, a cobrança obrigatória do consumo de energia reativa capacitiva. Veio então a portaria 1569 que conseguiu eliminar os últimos problemas, flexibilizando a questão capacitiva.

Assim a portaria que alterou o fator de potência de referência (portaria 85 - de 25 de março de 1992) sofreu duas alterações, uma primeira foi realizada pela portaria 613, de 9 de junho de 1993, revogando a portaria 85, e a segunda foi a portaria 1569, de 23 de dezembro de 1993, que revogou a portaria 613, a qual é vigente pelo menos até esta data (novembro de 1995).

6.1- PORTARIA 85 [40]

A portaria 85, de 25 de março de 1992, alterou o fator de potência de referência de 0,85 para 0,92 indutivo, considerando entre as 6 horas e 24 horas ou 0,92 capacitivo, entre 00,00 e 6 horas, bem como a maneira de calcular o reativo excedente, pois na portaria anterior o cálculo do reativo excedente era mensal.

O reativo excedente de acordo com a portaria é dado pela equação (56) e (57).

$$FER = \sum_{I=1}^{N} [CAI_{(P)} \cdot (\frac{FPr}{FPi_{(P)}} - 1)] . TCA \quad (56)$$

$$FDR_{(P)} = máx \sum_{I=1}^{N} [DAI_{(P)} \cdot \frac{FPr}{FPi_{(P)}} - DA_{(P)}] . TDA_{(P)} \quad (57)$$

onde:

p - Horário de ponta ou fora de ponta, ou ainda o período de faturamento;

N - Número de intervalos de integralização, de 1 (uma) hora, no período de faturamento.

Fpr - Fator de potência de referência (0,92):

Fpi - Fator de potência das instalações elétricas das unidades consumidoras, que é definida como o coseno da ângulo φ (cos φ), calculado a partir do fornecimento de energia ativa [kWh] ou demanda de potência [kW], e do fornecimento ou recebimento de energia reativa (kVArh) ou demanda de potência reativa (kVAr), verificada em cada intervalo de integralização de 1 (uma) hora.

No caso de não haver condições para medições da potência reativa excedente de acordo com as equações (56) e (57), deve-se calcular o FER e FDR de acordo com as equaçãos (58) e (59).

$$FER_{(P)} = \left[\sum_{T=1}^{N} CA_{(P)} \cdot (\frac{FPr}{FPm_{(P)}} - 1) \right] . TCA_{(P)} \quad (58)$$

$$FDR_{(P)} = \left[\underset{t=1}{\overset{N}{MÁX}} . (DAM_{(P)} \cdot \frac{FPr}{FPm_{(P)}} - DA_{(P)}) \right] . TDA_{(P)} \quad (59)$$

FER (faturamento de energia reativa) - Determina que o faturamento correspondente ao total da energia reativa (kVArh), excedente à quantidade permitida pelo o limite do fator de potência de referência (FPr), verificada por medição apropriada, em cada intervalo de integralização, de 1(uma) hora, computado por posto horário (p), durante o período de faturamento, observado o horário de faturamento indutivo ou capacitivo.

FDR (faturamento de demanda de energia) - Determina que o faturamento correspondente à demanda de potência reativa (kVAr), excedente à quantidade permitida pelo o fator de potência de referência (FPr), verificada por medição apropriada, em cada intervalo de integralização, de 1(uma) hora, computado por posto horário (p), durante o período de faturamento, observado o horário de faturamento indutivo ou capacitivo.

DAI - Demanda de potência ativa [kW], verificada por posto apropriado, no intervalo de integralização, de 1 (uma) hora, nos postos tarifários (p), durante o período de faturamento.

DA - Demanda de potência ativa [kW] faturável, nos postos horários (p), durante o período de faturamento, e em conformidade com a legislação vigente no que se refere a estrutura e modalidade da tarifa de aplicação da unidade consumidora.

DAM- Demanda de potência ativa máxima faturável, nos postos horários (p), durante o período de faturamento, e em conformidade com a legislação vigente no que se refere a estrutura e modalidade de tarifa de aplicação da unidade consumidora;

MÁX- Função que indentifica o maior valor de demanda de potência ativa em [kW].

TDA- Tarifa de demanda de potência ativa em conformidade com a legislação vigente.

TCA- Tarifa de consumo de potência ativa em conformidade com a legislação vigente.

Para que se possa efetuar estas medições do fator de potência, é necessário às indústrias prepararem e adequarem suas instalações. Devido a isso o DNAEE concedeu um prazo de 24 meses para os fornecimento existentes ou contratados, e para os casos de novos fornecimentos e aumento de cargas não contratadas um prazo de 120 dias, após a data de publicação da portaria 85.

Fica a critério do concessionário e mediante homologação do DNAEE, que poderá ser dado um prazo adicional aos fornecimentos existentes ou contratados, desde que comprovada a situação de excepcionalidade no que se refere a impossibilidade de preparação e adequação das instalações no prazo de 24 meses após a data de publicação.

A critério do concessionário e mediante homologação do DNAEE, poderão ser definidas condições e formas de faturamento de energia reativa, com os horários diferentes dos estabelecidos.

6.2 - PORTARIA 613 [41]

A portaria 613 confirma a alteração do fator de potência de referência de 0,85 para 0,92 indutivo, entre as 6 horas e 24 horas ou 0,92 capacitivo, entre 00,00 e 6 horas.

O cálculo do FER e FDR transitoriamente deverá ser mensal até março de 1996, mas com o novo fator de potência de referência de 0,92, como mostra as equação (58) e (59). A partir desta data, o cálculo do FER e FDR será novamente conforme as equaçãos (56) e (57).

A critério do concessionário, fica em sua decisão levar apenas em conta a energia reativa indutiva ou também a energia reativa capacitiva, associada ao fornecimento.

Adotada a alternativa de considerar também a energia reativa capacitiva, o faturamento existente ficará condicionado à prévia notificação ao consumidor, e só poderá ser efetuado até que o mesmo comunique ao concessionário ter corrigido o fator de potência.

Caso se leve em conta a energia reativa capacitiva, o concessionário poderá instalar medição provisória para esta energia reativa capacitiva, num período mínimo de 15 dias, inclusive para fornecimentos realizados em alta tensão e somar os módulos das energias reativas indutiva e capacitiva para o cálculo do fator de potência médio.

Não sendo possível distinguir o fator de potência correspondente a cada modalidade de fornecimento, será considerado o fator de potência correspondente ao fornecimento global.

No cálculo do faturamento das energias e demanda de potência excedentes FER e FDR, não se computará valores negativos das mesmas, nem se aplicará tarifa de ultrapassagem.

Através de proposição e sujeito a homologação do DNAEE, poderão ser celebrados acordos para situações excepcionais relacionadas com a matéria regulamentada pela portaria.

6.3 - PORTARIA 1569 [42]

A portaria 1569, de 23 de dezembro de 1993, confirma a cobrança do fator de potência indutivo ou capacitivo e a elevação do fator de potência de referência para 0,92, conforme a portaria 613.

A portaria 1569, confirma que as equações (56) e (57) entraram em vigor em março de 1996, enquanto isso o FER e FDR são calculados pelo o fator de potência médio (fm) com o novo limite de 0,92, conforme as equações (58) e (59).

Enquanto não for instalada medição apropriada para a determinação dos fatores de potência nos horários estabelecidos, o fator de potência para efeito do FER e FDR será médio indutivo. Verificada por posto horário no caso de unidades faturadas na estrutura horo-sazonal e durante o período de faturamento para as unidades faturadas na tarifa convencional.

No caso de unidades consumidoras com fornecimentos aos quais se aplicam tarifas especiais, os faturamentos de energia e demanda de potência reativas excedentes se farão em relação a cada um desses fornecimentos, podendo, entretanto, a pedido do consumidor, o fator de potência ser calculado em função do montante global de energia reativa e de energia ativa, considerando o fornecimento da unidade como um todo, desde que não haja prejuízo para o sistema elétrico do concessionário.

Para fins de faturamento de energia e demanda de potência reativas excedentes FER e FDR, são considerados somente os valores, ou parcelas, positivas das mesmas e não será aplicado as tarifas de ultrapassagem.

Não sendo possível distinguir o fator de potência correspondente a cada modalidade de fornecimento, será considerado o fator de potência correspondente ao fornecimento global.

A critério do concessionário e aprovação do DNAEE, poderão ser definidos condições e formas especiais de medição e faturamento de energia e de demanda de potência reativa excedente com horários diferentes.

Para as unidades consumidoras que contratarem, a partir de abril de 1996, o fornecimento na modalidade hora-sazonal, o concessionário poderá conceder um prazo não superior a 90 (noventa) dias para adequar suas instalação para a nova cobrança do fator de potência.

O descrito na portaria 1569, com relação ao faturamento de energia excedente, ficará condicionado à prévia notificação ao consumidor, e só poderá ser efetuado até que o mesmo comunique ao concessionário ter corrigido o fator de potência de suas instalações.

As omissões, dúvidas e casos não previstos serão resolvidos pelo DNAEE.

Escola de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

6.4- COMENTÁRIOS SOBRE AS PORTARIAS [51]

Nota-se nas portarias uma preocupação com relação à adequação das instalações para o novo fator de potência, pois as portarias concedem prazos longos para a realização destes trabalhos.

Também é observado que as portarias deixaram a critério do concessionário formas especiais de medição e faturamento, desde que aprovado pelo DNAEE.

As mudanças introduzidas pela portaria 1569 é basicamente referente às concessionárias, impondo uma melhor redação. Um exemplo disto é que a portaria 613 não explicava claramente o problema referente consumidor/tarifação.

É importante dizer que as concessionárias não possuem autonomia para alterar as portarias sem uma aprovação do DNAEE.

Observa-se que as portarias eram "compreensivas" no que se diz respeito ao faturamento de energia em relação a adequação das instalações do consumidor, pois a cobrança da potência reativa capacitiva excedente ficava a critério do concessionário cobrar ou não. Caso o consumidor não tivesse adequado suas instalações, caso viesse cobrar, deveria avisar a sua cobrança com antecedência e, as portarias afirmavam que se as instalações não tivessem adequadas as novas formas de cobrança do FER e FDR (equações (56) e (57)), estes seriam calculados de acordo com as equações (58) e (59).

As portarias a princípio deveriam ter sido eleboradas com muito cuidado, pois trata-se de uma mudança radical, tanto na elevação do fator de potência de referência como no modo de calcular o reativo excedente. Nas portarias ficou sempre pelo ao menos a possibilidade de negociação entre o concessionário e o consumidor com relação às condições de faturamento e medição e às omissões, dúvidas e casos não previsto pelas portarias devem ser resolvidas pelo DNAEE.

7- CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A correção do fator de potência nas instalações deve ser realizada em função da componente fundamental. Mas para o caso de instalações onde possuam CEE (carga elétrica especial) deve-se corrigir o fator de potência um pouco acima do valor desejável.

Como mostrado anteriormente o fator de potência devido os componentes fundamentais de tensão e corrente é dado por:

$$FP = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \cos\varphi_1 \qquad (60)$$

Para a determinação do fator de potência de referência atual, como se observa na equação (61) deve-se ter os valores da potência ativa e reativa da instalação pelo menos na frequência fundamental.

Um dos métodos utilizados é o das potências médias. Este método baseia-se na apuração das potências ativas e reativas, durante um período que represente a operação normal da indústria, e seja calculada a média aritmética dessas potências.

Pode ser solicitada à concessionária, os valores relativos das potências ativa e reativa a cada 5 minutos, 15 minutos ou 1 hora. Deve-se solicitar no mínimo um período de 1(um) mês. A tabela 1, mostra um resultado típico de potência ativa e fator de potência, de 15 em 15 minutos, obtidas a partir de informações da concessionária.

De posse das potência médias, calcula-se o fator de potência da instalação de acordo com a equação (60), utiliza-se os bancos de capacitores para a correção do fator de potência para atingir o valor mínimo exigido pela norma vigente (portaria 1569) que é 0,92.

O cálculo para a determinação da potência reativa necessária para elevar o fator de potência ao nível desejado, pode ser determinado pela equação (61):

$$Q_{BNC} = P.(Tg\varphi_1 - Tg\varphi_2) \qquad (61)$$

para:

$\varphi_1 = \arccos(FP_1)$

$\varphi_2 = \arccos(FP_2)$

onde:

- P - Potência ativa do sistema, em [kW];
- FP_1 - Fator de potência atual da instalação;
- FP_2 - Fator de potência desejável para a instalação;
- φ_1 - Ângulo correspondente ao fator de potência original;
- φ_2 - Ângulo correspondente ao fator de potência pretendido.

POTÊNCIA ATIVA[kW]	FP
844,2	0,88
1412	0,90
1464	0,90
1006	0,91
552,5	0,80
861,8	0,88
1427	0,90
1481	0,90
1557	0,92
551,3	0,81
808,9	0,88
1361	0,90
1471	0,91
1093	0,93
551,3	0,81
858,7	0,88
1396	0,90
1448	0,90
1293	0,90
666,5	0,82
572,7	0,91
862,5	0,90
1396	0,90
1381	0,90
1361	0,91
330,1	0,82
672,8	0,84
977,1	0,91
A POTÊNCIA ATIVA MÉDIA= 1039	

TABELA 1- VALORES DE POTÊNCIA ATIVA E FATOR DE POTÊNCIA

Exemplo:

De acordo com a tabela 1, uma instalação industrial sem CEE possui uma a potência ativa média de 1039 [kW]; sabendo-se que o fator de potência é de 0,852, deseja-se elevar o fator de potência então, ao nível recomendado, 0,94.

$$\varphi_1 = \text{ARCOS}(0,852) = 31,57°$$

$$\varphi_2 = \text{ARCOS}(0,94) = 19,94°$$

$$Q_{NBC} = P.(Tg\varphi_1 - Tg\varphi_2)$$

$$Q_{NBC} = 1,039.[Tg(32,57°) - Tg(19,94°)]$$

$$Q_{NBC} = 0,286\ [MVAr]$$

Se solicitado a fornecer dados, as concessionárias entregam aos seus consumidores valores da potência ativa e do fator de potência. Caso se use um

computador para o cálculo do valor médio do fator de potência, não se recomenda calcular o fator de potência através da média dos fatores de potências fornecidos pela concessionária, pois pode-se ter erros, erros estes, que são devido a simples soma dos fatores de potência.

7.1- CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA JUNTO A MOTORES DE INDUÇÃO

Uma das cargas mais importantes de um sistema industrial é o motor de indução trifásico. Desta forma, apresentam-se a seguir, considerações a respeito da definição da potência do banco de capacitores para compensação individual do fator de potência em motores de indução trifásico com rotor de tipo gaiola de esquilo.

No caso específico de motores de indução, o banco de capacitores deve ter a sua potência limitada, a aproximadamente, 90% da potência reativa do motor em operação sem carga que pode ser determinada a partir da corrente a vazio ([3] e [1]), esta limitação deve-se ao problema da auto-excitação.

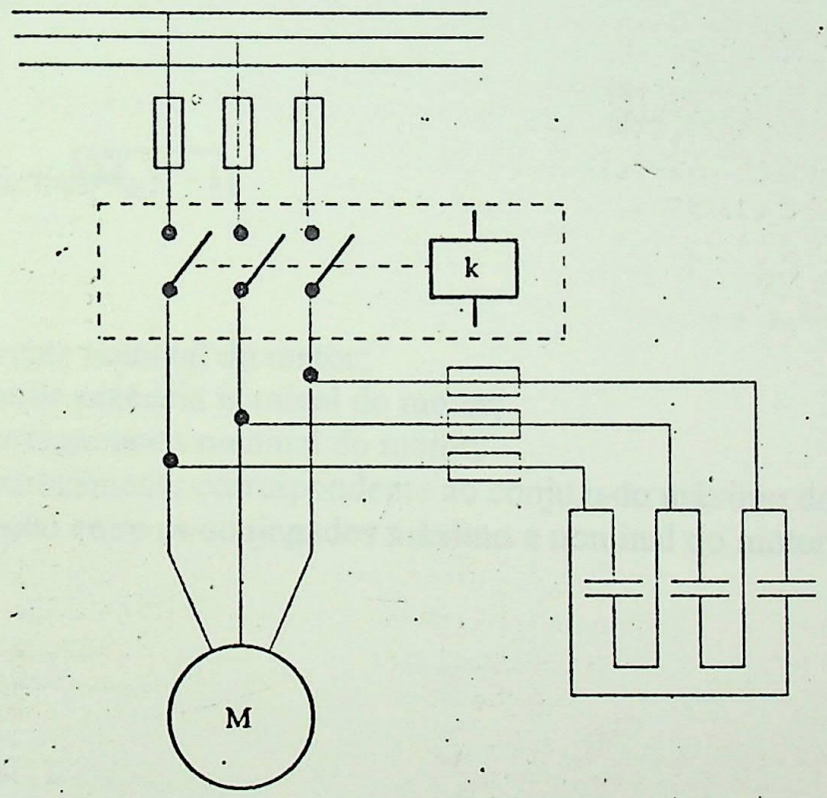


FIGURA 11- CIRCUITO DE LIGAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES COM O MOTOR COM RISCO DE AUTO-EXCITAÇÃO

A potência reativa para operação a vazio Q_0 pode ser calculada a partir do ângulo de deslocamento φ_0, da corrente a vazio I_0 e da tensão U.

$$Q_0 = \sqrt{3}.U.I_0 \operatorname{sen}\varphi_0 \cong \sqrt{3}.U_N.I_0 \qquad (62)$$

logo a potência do banco de capacitores, será:

$$Q_{NBC} = 0,9.Q_0 \tag{63}$$

onde:

Q_0 - Potência reativa para operação a vazio;
U - Tensão de operação do motor;
U_N - Tensão nominal do motor;
I_0 - Corrente a vazio do motor;
φ_0 - Ângulo de deslocamento a vazio do motor.

A corrente a vazio do motor pode ser calculada de forma aproximada pela equação abaixo:

$$I_0 = I_N.\left[\left(\sqrt{1 - FP_N^2}\right) - \frac{s_N}{s_{KN}}.FP_N\right] \tag{64}$$

onde:

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \tag{65}$$

$$s_{KN} = s_N[\overline{M}_K + \sqrt{(\overline{M}_K)^2 - 1}] \tag{66}$$

onde:

I_N - Corrente nominal do motor;
FP_N - Fator de potência nominal do motor;
s_N - Escorregamento nominal do motor;
s_{KN} - Escorregamento correspondente ao conjugado máximo do motor;
$\overline{M}_K$ - Relação entre os conjugados máximo e nominal do motor.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE CARGAS

ANÁLISE DE CARGAS

1 - INTRODUÇÃO

Pode-se dividir as cargas elétricas industriais em dois tipos: cargas normais e especiais. As cargas normais são aquelas que não distorcem as formas de onda da tensão e corrente quando em operação. Já as cargas elétricas especiais (CEE) são do tipo não-lineares, ou seja, distorcem as formas de onda da tensão e da corrente.

Serão analisadas as cargas de um sistema industrial com relação ao fator de potência e os harmônicos. Apresentam-se ainda normas que limitam tais harmônicos.

2 - CARGA ELÉTRICA VERSUS FATOR DE POTÊNCIA

Há uma preocupação generalizada na busca de melhoria dos equipamentos, sendo que as de normas de um modo geral definem suas eficiências mínimas. O interesse é maior, com motores, já que estes representam mais de 50% do consumo de energia elétrica no pais [30].

Por outro lado, muitas são as causas do baixo fator de potência dos equipamentos e de uma forma geral, podem ser apresentadas as seguintes causas [34]:

- Motores trabalhando a vazio, durante uma grande parte do tempo em operação;
- Transformadores ligados a vazio (pouca carga) por longo período de tempo;
- Grande números de motores de pequena potência em operação;
- Lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio e vapor de sódio) e lâmpadas fluorescente ligadas a reatores de baixo fator de potência;
- Motores, operando com níveis de tensão da instalação diferente (normalmente acima) da nominal [66];
- Fornos a arco em operação;
- Máquinas de solda;
- Equipamentos eletrônicos;
- Condicionadores de ar (modelos mais antigos).

2.1 - CARGAS NORMAIS

Das cargas normais em um sistema industrial, de maior influência sobre o fator de potência são os motores. A tabela 1 mostra a participação da força motriz para vários setores no Brasil em 1983 [43].

SETORES	MOTRIZ	CALOR DE PROCESSO	AQUECIMENTO DIRETO	ILUMINAÇÃO	ELETROQUÍMICA	OUTROS	TOTAL (%)
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	60,0%	16,1	15,2	3,5	2,1	3,1	100
SETOR ENERGÉTICO	96,5%	3,5	-	-	-		100
RESIDENCIAL	39,7%	44,0	-	2,0	-	14,3	100
COMERCIAL	52,0%	0,7	29,6	17,7	-	-	100
PÚBLICO	69,8%	0,2	8,0	22,0	-	-	100
AGROPECUÁRIO	94,5%	0,9	3,2	-	-	1,4	100
TRANSPORTES	100,0%	-	-	-	-	-	100
INDÚSTRIA TOTAL	62,4%	12,7	20,3	0,4	3,6	0,6	100
CIMENTO	93,5%	-	5,3	0,6	-	0,6	100
FERRO GUSA E AÇO	1,7%	0,6	97,1	0,3	-	0,3	100
FERRO-LIGAS	12,6%	-	87,4	-	-	-	100
MINERAÇÃO/ PELOTIZAÇÃO	71,2%	-	28,3	-	-	0,5	100
QUÍMICA	84,0%	5,2	3,5	0,4	6,3	0,6	100
ALIMENTOS E BEBIDAS	6,6%	86,2	6,8	0,2		0,2	100
TÊXTIL	93,5%	4,3	0,4	0,7	-	1,1	100
PAPEL E CELULOSE	88,7%	9,5	0,8	0,5	-	0,5	100
CERÂMICA	75,8%	-	-	24,2	-	-	100

TABELA 1- PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DA FORÇA MOTRIZ EM VÁRIOS SETORES NO BRASIL [43]

Os motores elétricos no sistema industrial representam 69% do consumo de energia [81], e devido a sua simplicidade de construção, robustez e baixo custo de manutenção, os motores de indução são os mais utilizados, cerca de 90% do total da força motriz [43]. Devido a este grau de importância dos motores de indução nos sistemas industriais, deve-se observar o comportamento do fator de potência com a variação da carga e tensão sobre os mesmos.

Conforme [35] e [44], observou-se que o fator de potência é bastante influenciado pela variação da carga no eixo dos motores de indução trifásico. Uma redução de 100% para 50% na potência no eixo do motor, provoca uma variação no fator de potência entre 9,6% a 21,5%. A variação da tensão também interfere no fator de potência e no caso particular de uma elevação de tensão, provavelmente faz com que o motor entre na região de saturação, provocando um aumento de relutância do circuito magnético e redução da reatância de magnetização e com isso aumentando a corrente de magnetização, consequentemente piorando o fator de potência. A redução da tensão provoca uma diminuição da corrente de magnetização, consequentemente melhorando o fator de potência. Deve-se chamar atenção para não operar o motor com uma tensão abaixo da nominal com o objetivo de melhorar o fator de potência, devido o conjugado do motor diminuir com o quadrado da tensão, o que pode ocasionar sérios problemas aos motores que partem com carga. A figura 1 mostra um gráfico do comportamento do fator de potência com a variação da carga no eixo do motor, para os condições de tensão acima e abaixo da nominal para um motor de 15 [CV] ([35], [44]).

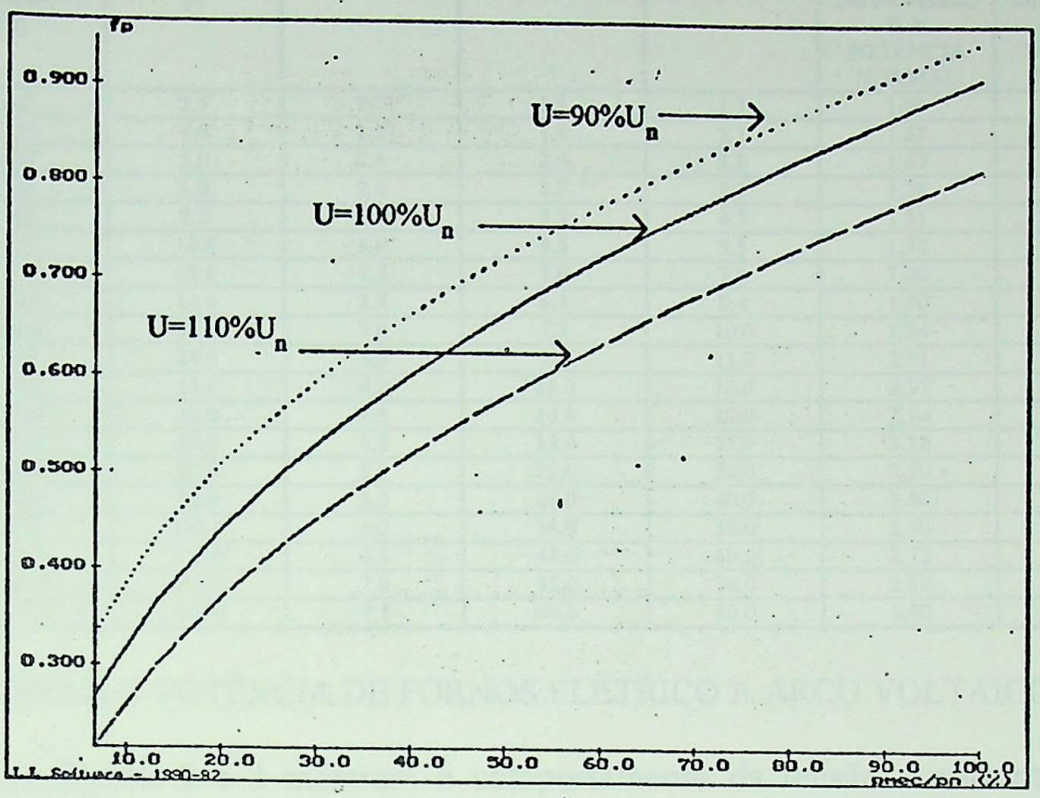


FIGURA 1 - CURVA DO FATOR DE POTÊNCIA VERSUS A POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO DO MOTOR ([35], [44])

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

2.2 - CARGAS ESPECIAIS

Uma carga especial no sistema industrial de grande importância com relação ao fator de potência é o forno a arco o qual utiliza as propriedades do arco elétrico, para produzir a fusão dos metais mantidos dentro de uma cuba isolada termicamente por material refratário.

Com o crescente desenvolvimento do país (Brasil), tem surgido periodicamente projetos industriais, onde os fornos elétricos são parte fundamental da carga. Em geral, apresentam uma potência concentrada elevada como mostra a tabela 2 [38].

Os fornos a arco são largamente utilizados nas instalações elétricas industriais destinadas a realizar fusões de metais ou para obtenção de reações químicas de redução que, transformam as matérias-primas em produtos que encontram grande utilização na indústria química (por ex., carbureto de cálcio para a produção de acetileno, silício metálico para a produção de silicones etc.) e principalmente a fusão do ferro, aço, etc.

Os fornos a arco tem a característica de trabalharem com baixo fator de potência, pois assim produzem um arco estável (contínuo), o qual é desejável. No caso de fornos monofásicos, o arco estável é conseguido no mínimo com o fator de potência menor que 0,65 e fornos trifásicos com fator de potência menor que 0,90 [68].

CAPACIDADE NORMAL EM TONELADA [t]	MÁXIMA EM TONELADA [t]	DIÂMETRO DA PANELA EM [m]	POTÊNCIA NORMAL DE FUSÃO[MVA]	POTÊNCIA MÁXIMA EM [MVA]	RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE NORMAL E A POTÊNCIA NORMAL	RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE MÁXIMA E A POTÊNCIA MÁXIMA
1,5	2,5	2,0	1,5	1,7	1,00	1,47
3,0	4,0	2,2	1,8	2,1	1,67	1,06
4,0	5,0	2,4	2,4	2,8	1,67	1,78
5,0	6,0	2,6	2,8	3,3	1,78	1,81
6,0	8,0	2,8	3,3	4,5	1,81	1,77
8,0	10,0	3,0	4,5	5,5	1,78	1,81
10,0	12,0	3,2	5,0	7,0	2,00	1,71
12,0	14,0	3,4	6,3	8,4	1,90	1,66
14,0	18,0	3,6	7,2	10,0	1,94	1,80
18,0	24,0	3,9	8,5	13,0	2,11	1,85
25,0	33,0	4,2	11,0	16,0	2,27	2,06
30,0	40,0	4,5	14,0	20,0	2,14	2,00
40,0	50,0	4,8	18,0	25,0	2,22	2,00
50,0	60,0	5,0	20,0	30,0	2,50	2,00
70,0	80,0	5,5	28,0	40,0	2,50	2,00
90,0	110,0	6,0	36,0	50,0	2,50	2,20
120,0	135,0	6,5	44,0	60,0	2,72	2,25
150,0	165,0	7,0	52,0	70,0	2,88	2,35
180,0	200,0	7,5	60,0	80,0	3,00	2,50

TABELA 2- POTÊNCIA DE FORNOS ELÉTRICO A ARCO VOLTAICO [38]

As figuras 2 e 3 mostram o comportamento da tensão e corrente de um forno a arco monofásico em duas situações, uma com fator de potência igual e outra maior que 0,65 respectivamente.

1 - Observe na figura 2, que quando o fator de potência é igual a 0,65, a condução torna-se contínua (estável), pois o circuito é suficientemente indutivo para a manutenção da corrente (decrescente) mesmo quando a queda de tensão do arco (Ua) for maior que a tensão entregue ao forno (U).

2 - Na figura 3, considera-se que o fator de potência é maior que 0,65, observe que a condução da corrente é descontínua (instável).

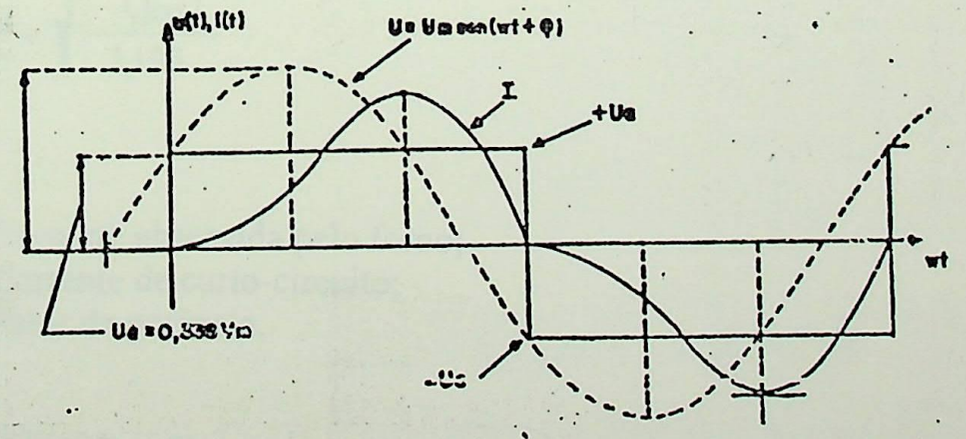


FIGURA 2- COMPORTAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE DE UM FORNO A ARCO MONOFÁSICO PARA UM FATOR DE POTÊNCIA IGUAL A 0,65 [68]

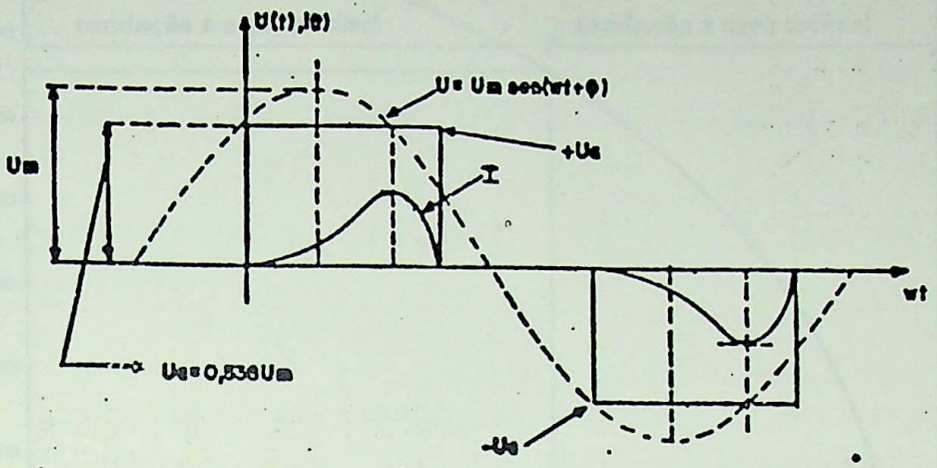


FIGURA 3- COMPORTAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE DE UM FORNO A ARCO MONOFÁSICO PARA UM FATOR DE POTÊNCIA MAIOR QUE 0,65 [68]

Conforme [68], o fator de potência pode ser determinado a partir da corrente de operação de um forno a arco monofásico.

$$FP = 0{,}828.\sqrt{1-\left(\frac{I}{Icc}\right)^2} \qquad (1)$$

já para um forno a arco trifásico, tem-se:

$$FP = \sqrt{\frac{1-\left(\frac{I}{Icc}\right)^2}{1{,}195}} \qquad (2)$$

onde:

I - Corrente absorvida pelo forno;
Icc - Corrente de curto-circuito;
FP - Fator de potência.

Os gráficos das figuras 4 e 5 mostram o comportamento do fator de potência com relação a corrente do forno a arco monofásico e trifásico respectivamente. Observe que, à medida que a corrente do arco aumenta (corrente de carga) o fator de potência diminui.

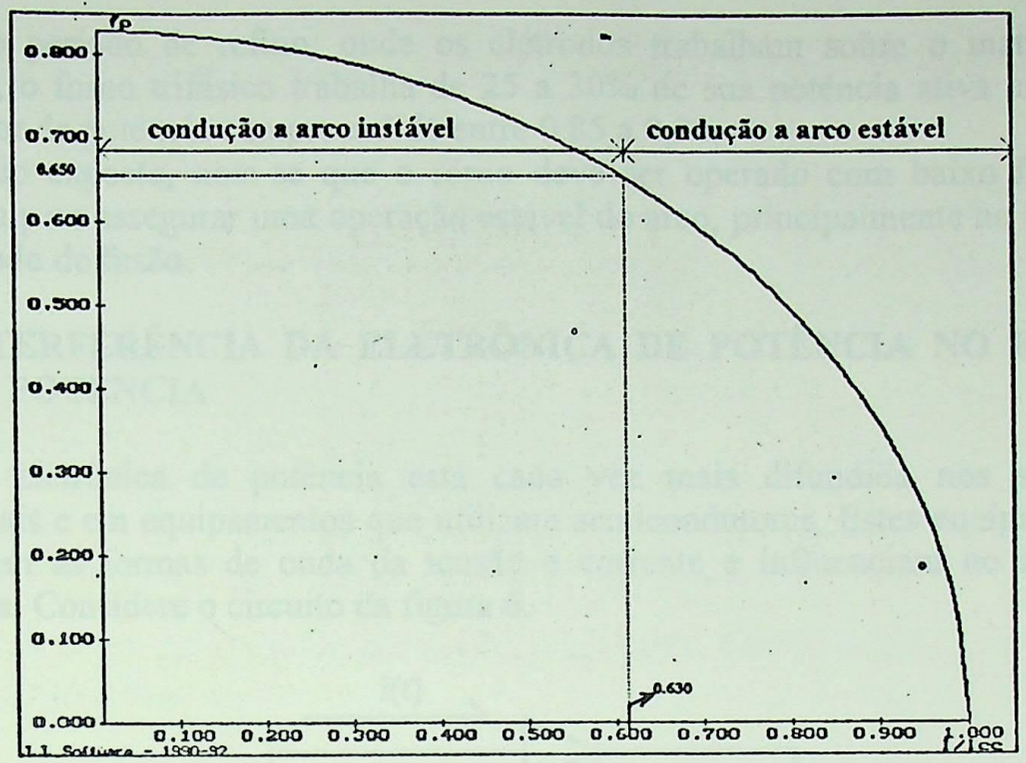


FIGURA 4- CURVA CARACTERÍSTICA DE UM FORNO A ARCO MONOFÁSICO (RESISTÊNCIA DA CARGA NÃO-LINEAR)

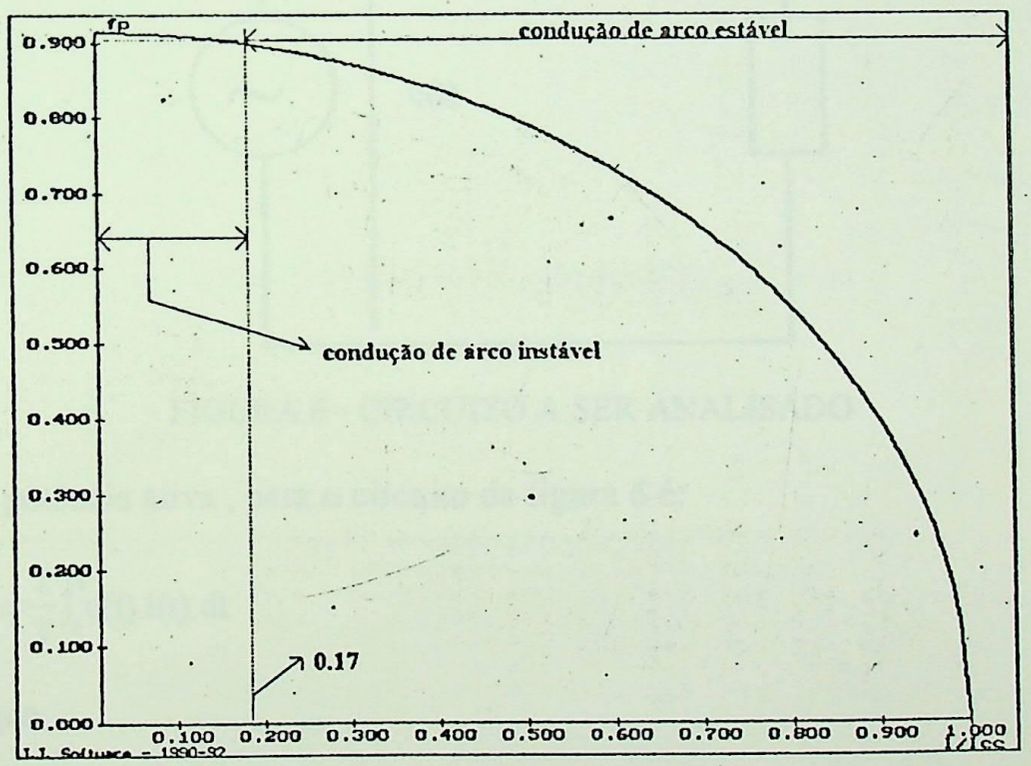


FIGURA 5- CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA FASE DE UM FORNO A ARCO TRIFÁSICO (RESISTÊNCIA DA CARGA NÃO-LINEAR)

O fator de potência de um forno elétrico a arco para a produção de aço passa por dois períodos distintos: o período de fusão e de refino [68].

No período de fusão o forno trifásico funciona em escala média, a uma potência ativa de 1,2 vezes aproximadamente da nominal de funcionamento do forno e com o fator de potência compreendido entre 0,75 a 0,85.

No período de refino, onde os elétrodos trabalham sobre o material já fundido, o forno trifásico trabalha de 25 a 30% de sua potência ativa nominal, com fator de potência compreendido entre 0,85 a 0,90.

Pelo exposto, nota-se que o forno deve ser operado com baixo fator de potência para assegurar uma operação estável do arco, principalmente no começo do período de fusão.

3 - INTERFERÊNCIA DA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA NO FATOR DE POTÊNCIA

A eletrônica de potência está cada vez mais difundida nos sistemas industriais e em equipamentos que utilizam semicondutores. Estes equipamentos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e influenciam no fator de potência. Considere o circuito da figura 6.

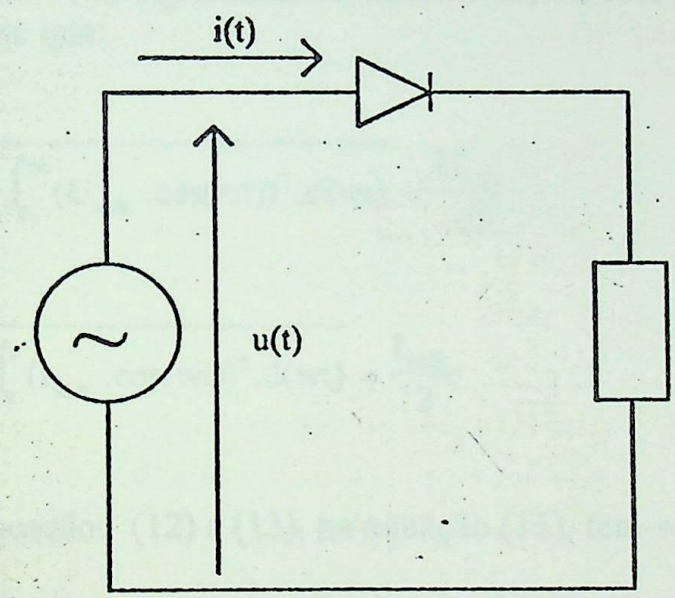


FIGURA 6 - CIRCUITO A SER ANALISADO

A potência ativa , para o circuito da figura 6 é:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt \qquad (3)$$

sendo que:

$$u(t) = \sqrt{2}.U.\cos(wt) \qquad (4)$$

$$i(t) = \sqrt{2}.I.\cos(wt) \qquad (5)$$

fazendo-se :

$$U_{MÁX} = \sqrt{2}.U \qquad (6)$$

$$I_{MÁX} = \sqrt{2}.I \qquad (7)$$

tem-se:

$$u(t) = U_{MÁX}.\cos(wt) \quad (8)$$

$$i(t) = I_{MÁX}.\cos(wt) \quad (9)$$

Com (8) e (9) em (3) tem-se:

$$P = \frac{U_{MÁX}.I_{MÁX}}{4} \quad (10)$$

A potência aparente é dada pela equação (11):

$$S = U_{RMS}.I_{RMS} \quad (11)$$

O valor eficaz de uma grandeza ou valor RMS, é a raiz média quadrática da mesma, logo tem-se que:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2.\pi}\int_0^{2\pi}(U_{MÁX}.\cos(wt))^2.d(wt)} = \frac{U_{MÁX}}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2.\pi}\int_0^{\pi}(I_{MÁX}.\cos(wt))^2.d(wt)} = \frac{I_{MÁX}}{2} \quad (13)$$

Substituindo as equaçãos (12) e (13), na equação (11), tem-se:

$$S = \frac{U_{MÁX}.I_{MÁX}}{2.\sqrt{2}} \quad (14)$$

Desta forma o fator de potência será dado por:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{U_{MÁX}.I_{MÁX}}{4}}{\frac{U_{MÁX}.I_{MÁX}}{2.\sqrt{2}}} = \frac{2.\sqrt{2}}{4} = 0,707 \quad (15)$$

Observe que o fator de potência não é unitário, apesar da carga ser totalmente resistiva.

No circuito discutido, o aumento do fator de potência não é conseguido simplesmente com a instalação de capacitores antes do diodo como mostra a figura 7. A melhoria do fator de potência, neste caso, é conseguida com a

instalação de filtros, que tornem a forma de onda da corrente mais senoidal, do ponto de vista da rede de suprimento de energia.

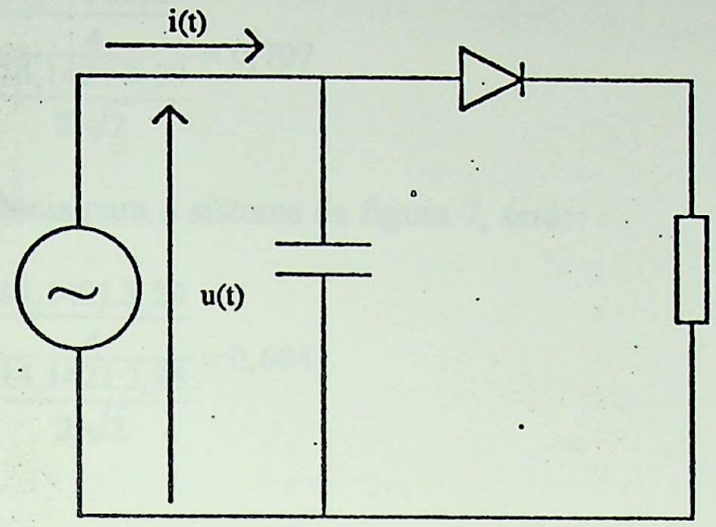


FIGURA 7- CIRCUITO DA FIGURA 6, COM CAPACITOR ANTES DO DIODO

Os resultados das simulações dos circuitos das figuras 6 e 7 são apresentadas na figura 8. Na figura 8 utiliza-se os seguintes dados (ver anexo 6):

- Tensão (pico) da fonte: 14,1421 [V];
- Resistência : 3 [ohms];
- Capacitor: 500 [uF].

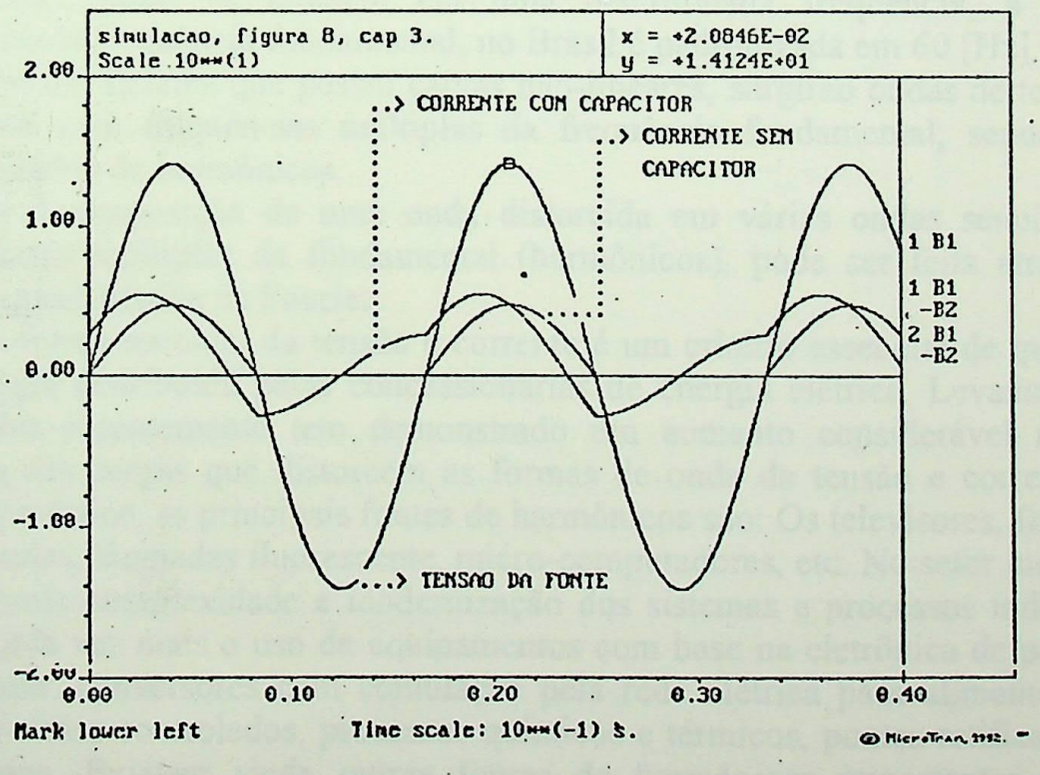


FIGURA 8- RESULTADO DA SIMULAÇÃO DAS FIGURAS 6 E 7

O fator de potência para o caso da figura 6 calculado pela equação 15, com base nos valores anteriores, será:

$$FP = \frac{\frac{14,1421.3,29}{4}}{\frac{14,1421.3,29}{2.\sqrt{2}}} = 0,707$$

já o fator de potência para o sistema da figura 7, será:

$$FP = \frac{\frac{14,1421.3,29}{4}}{\frac{14,1421.3,85}{2.\sqrt{2}}} = 0,604$$

Observe que a instalação de bancos de capacitores piora o fator de potência, concluindo-se então que, os equipamentos que estão envolvidos com a eletrônica de potência distorcem as formas de onda, e por conseqüência irão influir substancialmente.

4 - OS HARMÔNICOS PRESENTES EM CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS

Em condições ditas ideais, os sistemas elétricos possuem forma de onda da tensão e da corrente puramente senoidais.

Estas ondas se repetem em uma determinada frequência, a qual é denominada frequência fundamental, no Brasil é padronizada em 60 [Hz].

Em um sistema que possui cargas não-lineares, surgirão ondas de tensões e correntes com frequências múltiplas da frequência fundamental, sendo então denominados de harmônicos.

A decomposição de uma onda distorcida em várias ondas senoidais de frequências múltiplas da fundamental (harmônicos), pode ser feita através da série trigonométrica de Fourier.

A forma senoidal da tensão e corrente é um critério essencial de qualidade de energia distribuída pelas concessionárias de energia elétrica. Levantamentos efetuados recentemente tem demonstrado um aumento considerável na rede elétrica das cargas que distorcem as formas de onda da tensão e corrente. No setor doméstico, as principais fontes de harmônicos são: Os televisores, fornos de microondas, lâmpadas fluorescente, micro-computadores, etc. No setor industrial, a crescente complexidade e modernização dos sistemas e processos industriais, exige cada vez mais o uso de equipamentos com base na eletrônica de potência, tais como: conversores com comutação pela rede elétrica para alimentação de acionamentos controlados, processos químicos e térmicos, pontes retificadoras e inversores. Existem ainda outras fontes de harmônicos importantes onde a eletrôncia de potência não se faz presente. Nestes casos destacam-se: fornos a arco, máquinas de solda, etc. As figuras 9 e 10, mostram a forma de onda da

corrente e o espectro harmônico respectivamente, de uma lâmpada fluorescente com reator de partida rápida de 127 [V], 60 [Hz] , 40 [W].

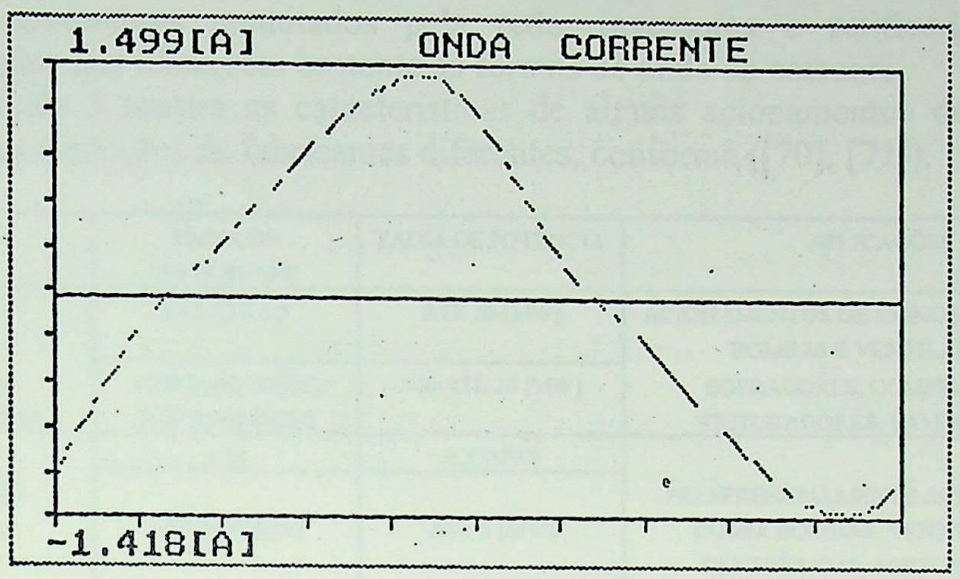


FIGURA 9- FORMA DE ONDA DA CORRENTE DE UMA LÂMPADA FLUORESCENTE DE 40 [W]

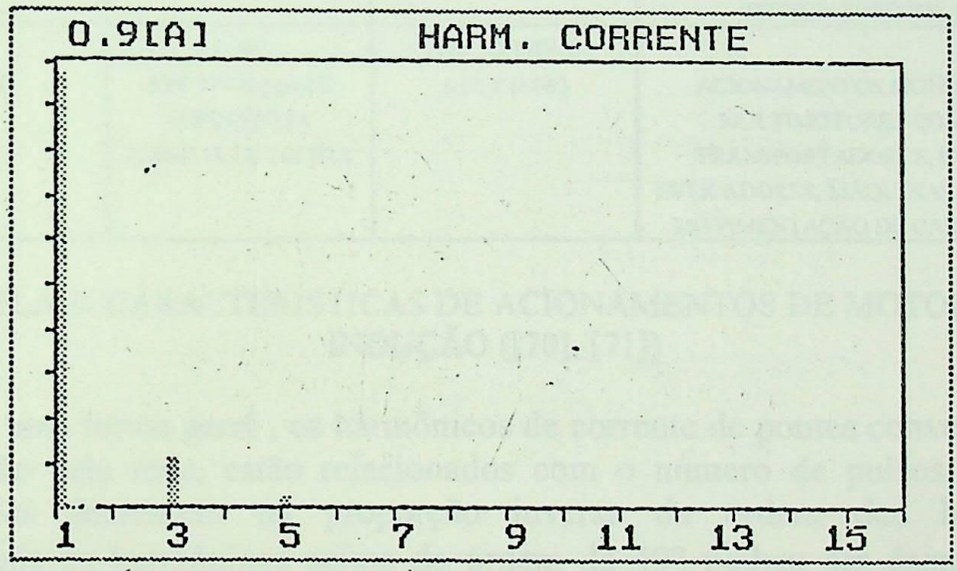


FIGURA 10- ESPECTRO DA FORMA DE ONDA DA FIGURA 9

A proliferação dos equipamentos causadores de perturbação e a preocupação crescente sobre os seus efeitos, proporcionaram à necessidade dos governos de estabelecerem critérios e procedimentos que limitem os harmônicos a níveis aceitáveis, procurando-se estabelecer uma convivência adequada entre equipamentos perturbadores e equipamentos sensíveis aos harmônicos.

4.1 - CARGAS COM ALTA INTENSIDADE DE HARMÔNICOS

Entre diversas cargas que distorcem as formas de onda da corrente em um sistema elétrico, apresentar-se a seguir as mais importantes em um sistema industrial.

4.1.1 - CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA

Os conversores comutados pela rede, inversores e retificadores, são equipamentos que distorcem bastante as formas de onda da corrente.

A tabela 3 mostra as características de alguns acionamentos de motores assíncronos (indução) de fabricantes diferentes, conforme ([70], [71]).

TIPO	FAIXA DE VELOCIDADE	FAIXA DE POTÊNCIA	APLICAÇÕES
CASCATA SUBSÍNCRONA	1:13 ATÉ 1:5	ATÉ 20 [MW]	ACIONAMENTOS DE MONOMOTORES COM BOMBAS E VENTILADORES SOPRADORES, COMPRESSORES, TRITURADORES, LAMINADORES.
	1500 [rpm] 50[Hz] 1600 [rpm] 60[Hz]	500 ATÉ 20 [MW]	
CORRENTE IMPOSTA	1:10	2,5 [MW]	PREFERENCIALMENTE ACIONAMENTO COMO: BOMBAS, VENTILADORES, CENTRÍFUGAS, MISTURADORES, AGITADORES,EXTRUSORAS, TRANSPORTADORES POR ESTEIRAS.
	ATÉ 5400 [rpm]	ATÉ 2 [MW]	
TENSÃO IMPOSTA	1:10	15 ATÉ 230 [kVA]	ACIONAMENTOS MONOMOTORES E MULTIMOTORES COMO: MÁQUINAS TEXTEIS E VENTILADORES.
PWM	1:100	ATÉ 1,2 [MVA]	ACIONAMENTOS MONOMOTORES E MULTIMOTORES COMO: ROLOS TRANSPORTADORES, EXTRUSORAS, ESTICADORES, MÁQUINAS FERRAMENTAS. MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS, DRAGAS.
	ATÉ 10000 [rpm] E FREQUÊNCIA MÁXIMA DE 166 [Hz]	ATÉ 8 [MW]	

TABELA 3- CARACTERÍSTICAS DE ACIONAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO ([70],-[71])

De uma forma geral , os harmônicos de corrente de pontes conversoras com comutação pela rede, estão relacionados com o número de pulsos (p) e suas amplitudes decrescem na proporção inversa da ordem dos harmônicos. Geralmente os harmônicos acima da ordem da 49° podem ser desprezados. A tabela 4 mostra os harmônicos teóricos e típicos de corrente dos conversores de 6 pulsos a diodos [32].

HARMÔNICOS	HARMÔNICOS TEÓRICOS EM [pu] DA FUNDAMENTAL DE CORRENTE	HARMÔNICOS TÍPICOS EM [pu] DA FUNDAMENTAL DE CORRENTE
5	0,200	0,173
7	0,143	0,111
11	0,091	0,045
13	0,077	0,029
17	0,059	0,015
19	0,053	0,010
23	0,043	0,009
25	0,010	0,008

TABELA 4 - HARMÔNICOS TEÓRICOS E TÍPICOS DE UM CONVERSOR DE 6 PULSOS A DIODOS[32]

Biblioteca MAUÁ

O conjunto sistema alimentador/conversor apresenta imperfeições de ordens práticas. A consequência é que a corrente no lado de corrente alternada do conversor, pode assumir uma forma de onda não característica do equipamento. Estas imperfeições produzem os denominados harmônicos não-característicos. Com isso, dificulta-se uma análise de harmônicos ainda na fase de projeto. Dentre essas imperfeições pode-se citar [39] e utilizando-se do esquema da figura 15 para as simulações (ver anexo 7):

a- O fato da indutância da carga ter um valor finito contribui para provocar ondulações na corrente, que serão responsáveis pelos harmônicos não característicos. A figura 11 mostra um resultado de uma forma de onda da corrente no secundário do transformador do retificador.

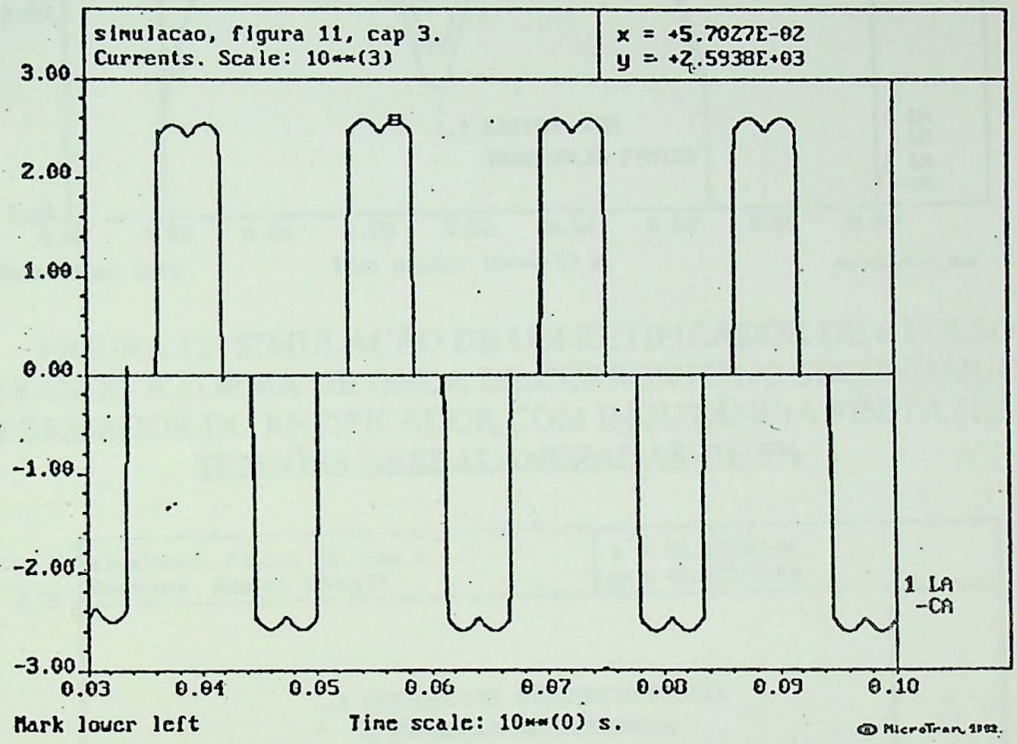


FIGURA 11- SIMULAÇÃO DA FIGURA 15 DE UM RETIFICADOR DE 6 PULSOS MOSTRANDO A FORMA DE ONDA DE CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR DO RETIFICADOR COM INDUTÂNCIA FINITA (1,3 mH)

b- As tensões do sistema de alimentação sempre apresentam um desbalanceamento ou distorção na forma de onda. O ângulo de disparo dos tiristores normalmente é realizado a partir do ponto de interseção de duas tensões do lado alternado ou de uma tensão de nível constante também do lado de corrente alternada. Se as tensões se apresentarem desbalanceadas ou distorcidas por harmônicos de tensão, os pontos de interseção não estarão igualmente espaçados e, em consequência, os instantes de disparo dos tiristores não serão equidistantes. A figura 12 ilustra o caso onde considera-se que a carga possue uma indutância finita e tensões desbalanceadas de 5%.

c- As impedâncias do sistema de suprimento de energia elétrica, transformador/conversor, cabos, etc, são diferentes nas três fases, provocando harmônicos não característicos. A figura 13 mostra a corrente no lado secundário do transformador de um retificador para diferenças de reatância nos cabos 3%.

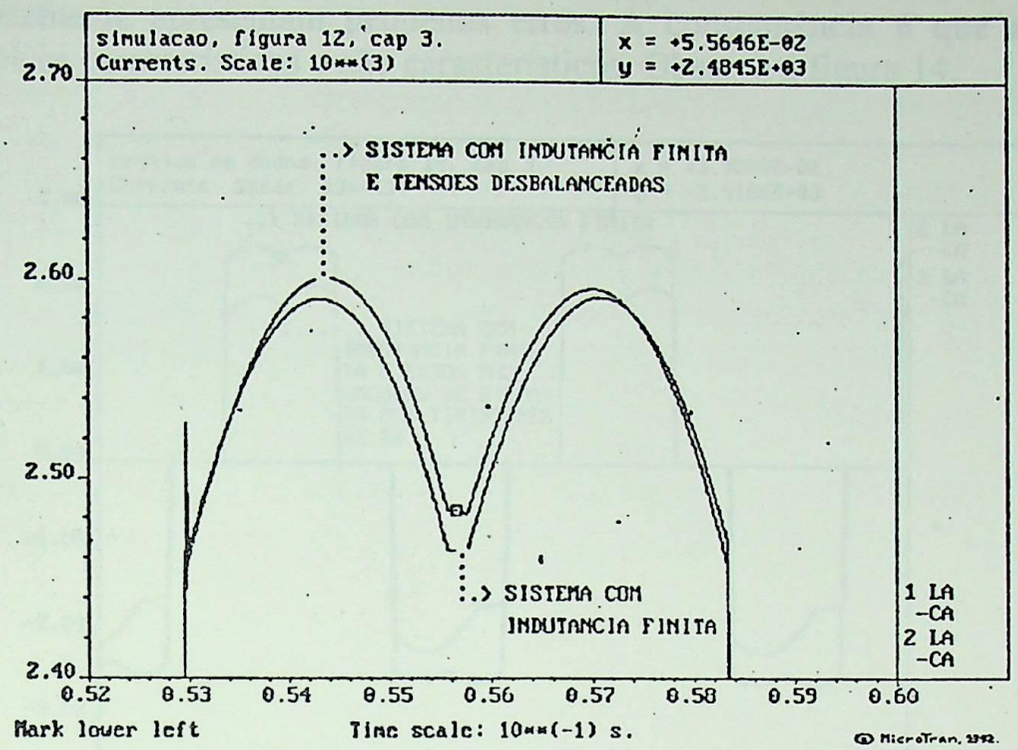


FIGURA 12- SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR DE 6 PULSOS MOSTRANDO A FORMA DE ONDA DE CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR DO RETIFICADOR COM INDUTÂNCIA FINITA (1,3 mH) E TENSÕES DESBALANCEADAS DE 5%

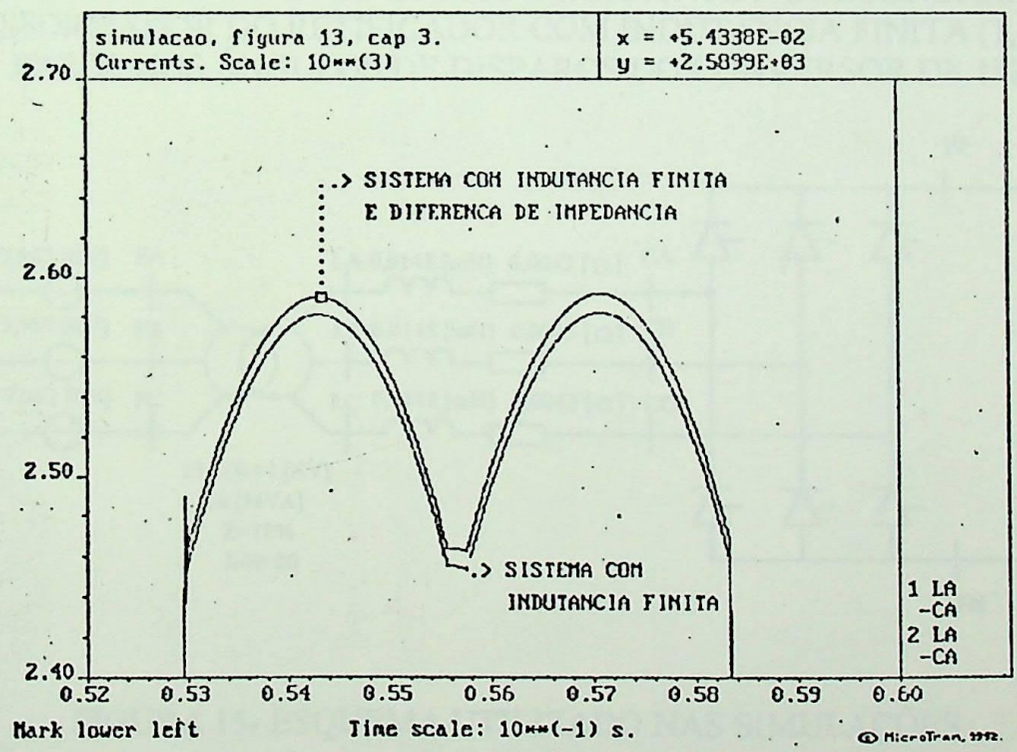


FIGURA 13- SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR DE 6 PULSOS MOSTRANDO A FORMA DE ONDA DE CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR DO RETIFICADOR COM INDUTÂNCIA FINITA (1,3mH) E DIFERENÇAS DE IMPEDÂNCIA DE 3% NOS CABOS DE ALIMENTAÇÃO

d- Os sistemas de controle do ângulo de disparo dos tiristores freqüentemente apresentam pequenos erros. A consequência é que aparecem harmônicos característicos e não característicos. Observe a figura 14.

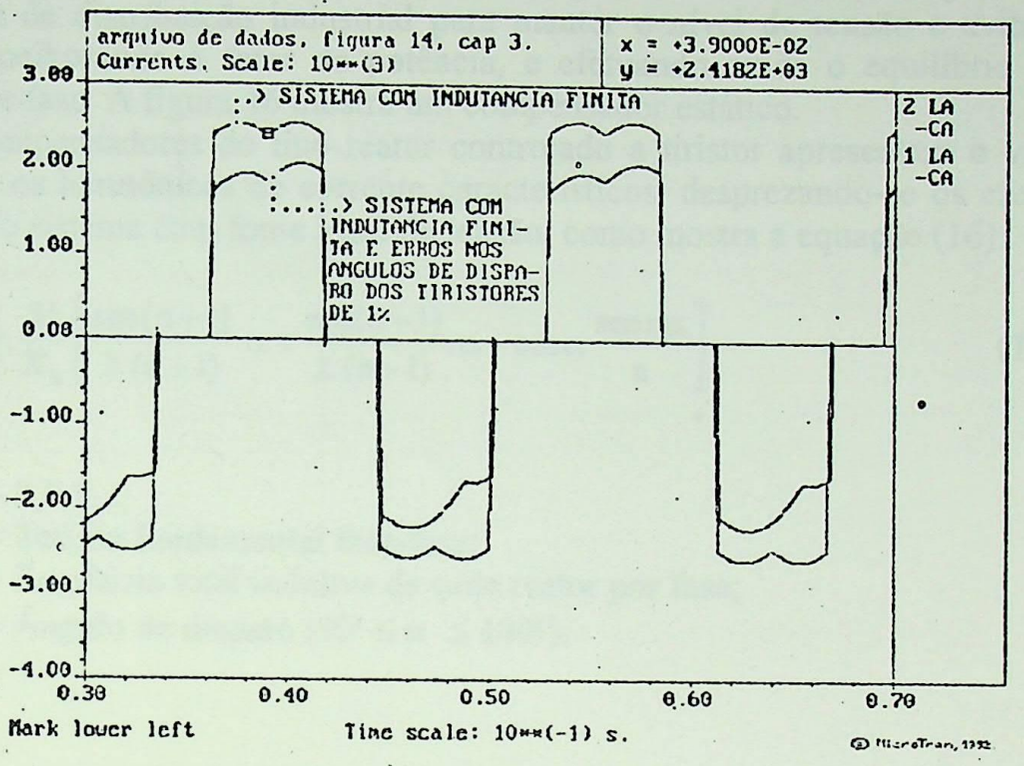


FIGURA 14- SIMULAÇÃO DE UM RETIFICADOR DE 6 PULSOS MOSTRANDO A FORMA DE ONDA DE CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR DO RETIFICADOR COM INDUTÂNCIA FINITA (1,3mH) E ERROS NOS ÂNGULOS DE DISPAROS DO CONVERSOR DE 1%

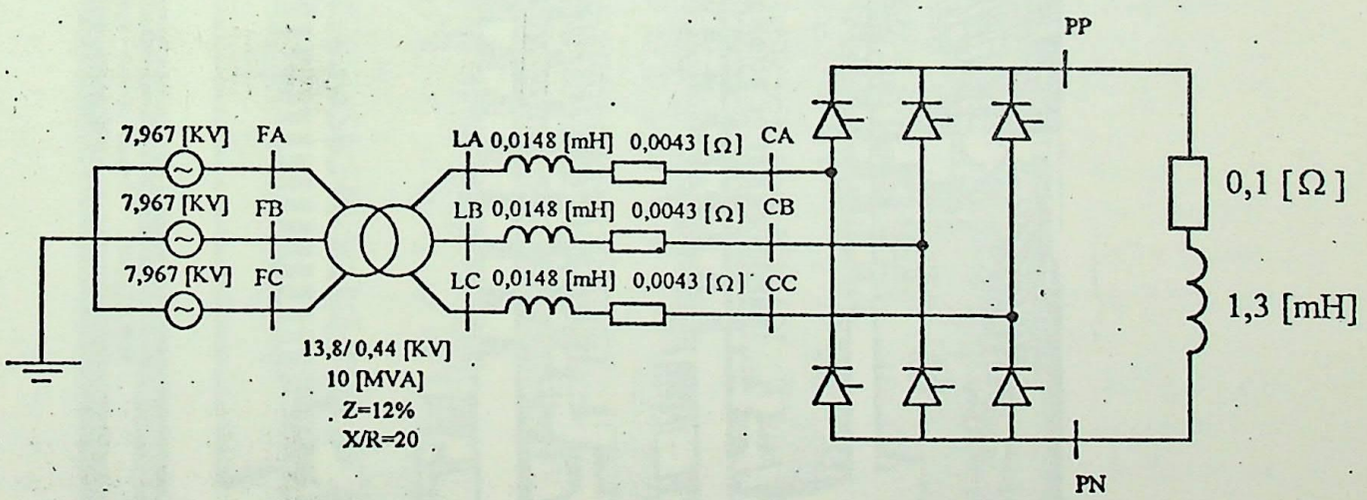


FIGURA 15- ESQUEMA UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

Como mostrado, os conversores distorcem as formas de onda da corrente cujas ordens e amplitudes são dependentes do tipo de imperfeição que o sistema alimentador/conversor apresenta. Estas imperfeições provocam o aparecimento de harmônicos não-característicos que não são previstos pela série trigonométrica de Fourier.

4.1.2 - COMPENSADORES ESTÁTICOS

Os reatores controlados através de tiristores tem sido usado principalmente em sistema de distribuição industrial para manter o nível de tensão e evitar o "flicker", melhorando o fator de potência, e efetuando ainda o equilíbrio das correntes de fase. A figura 16 mostra um compensador estático.

Os compensadores do tipo reator controlado a tiristor apresentam o valor eficaz para os harmônicos de corrente característicos, desprezando-se os efeitos resistivos do sistema com fonte ideal de tensão, como mostra a equação (16):

$$I_n = \frac{4}{\pi}.\frac{U}{X_R}\left[\frac{\text{sen}(n+1)}{2.(n+1)}.\alpha + \frac{\text{sen}(n-1)}{2.(n-1)}.\alpha - \cos\alpha\frac{\text{sen}\,n\alpha}{n}\right] \qquad (16)$$

onde:

- n - 3,5,7...;
- U - Tensão fundamental fase-fase;
- X_R - Reatância total indutiva de cada reator por fase;
- α - Ângulo de disparo ($90^o \leq \alpha \leq 180^o$).

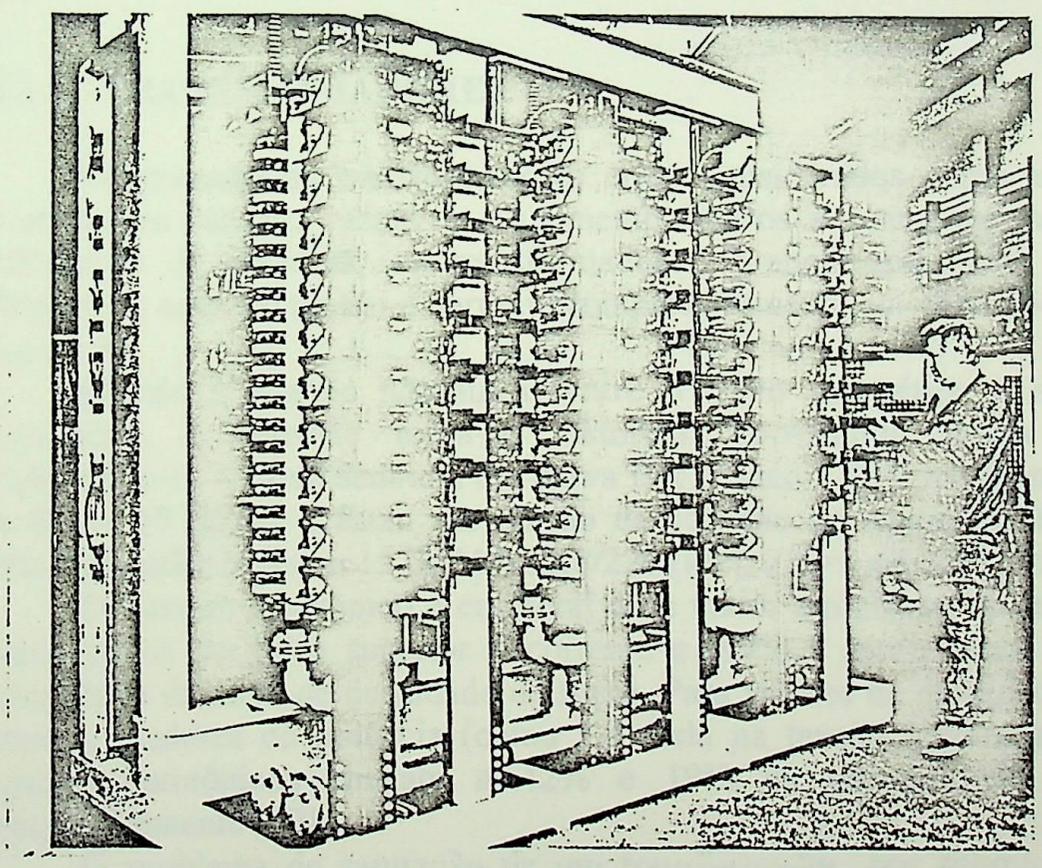


FIGURA 16- FOTO DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO [77]

A tabela 5 mostra as amplitudes típicas de um reator controlado a tiristor (TCR):

ORDEM DO HARMÔNICO PRESENTE	AMPLITUDE DO HARMÔNICO EM PERCENTAGEM	ORDEM DO HARMÔNICO PRESENTE	AMPLITUDE DO HARMÔNICO
1	100,00	13	0,75
3	13,78	15	0,57
5	5,05	17	0,44
7	2,59	19	0,35
9	1,57	21	0,29
11	1,05	23	0,24

TABELA 5- AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO PARA CHAVEAMENTO DE REATOR [33]

4.1.3 - TRANSFORMADORES

No passado os transformadores eram considerados como uma fonte de harmônicos bastante razoável. Atualmente face os sistemas que se utilizam da eletrônica de potência, os transformadores, praticamente, não distorcem as formas de onda de tensão e corrente comparativamente em condições normais de operação.

Devido a relação não linear entre o fluxo magnético e a corrente de excitação, a corrente torna-se distorcida, possuindo assim harmônicos. Admitindo-se o fluxo senoidal e a curva B x H média do ferro do transformador, a figura 17 ilustra o fluxo em função da corrente de magnetização I_0 para um transformador trifásico 15 [kVA], 13,8/220 [kV], Z%=3,66 e 60 [Hz].

O terceiro harmônico é em geral o de maior amplitude. A percentagem de harmônicos de valor superior a corrente a vazio é tanto maior quanto for a amplitude da onda de densidade de fluxo. Para valores de densidade de fluxo de transformadores de potência (como 1,4 tesla na tensão nominal), o terceiro e quinto harmônicos chegam a 42% e 18% da corrente de magnetização respectivamente [29].

O problema de saturação de um transformador, por sobretensão, torna a corrente de magnetização composta de outros harmônicos ímpares. Considerando que os harmônicos múltiplos de 3 são absorvidos em grande parte pelos enrolamentos quando conectado em triângulo, surgem tipicamente os harmônicos de ordem 5°, 7°, 11°, 13°, 17°, 19°, etc, observe que são os mesmos de retificador de 6 pulsos.

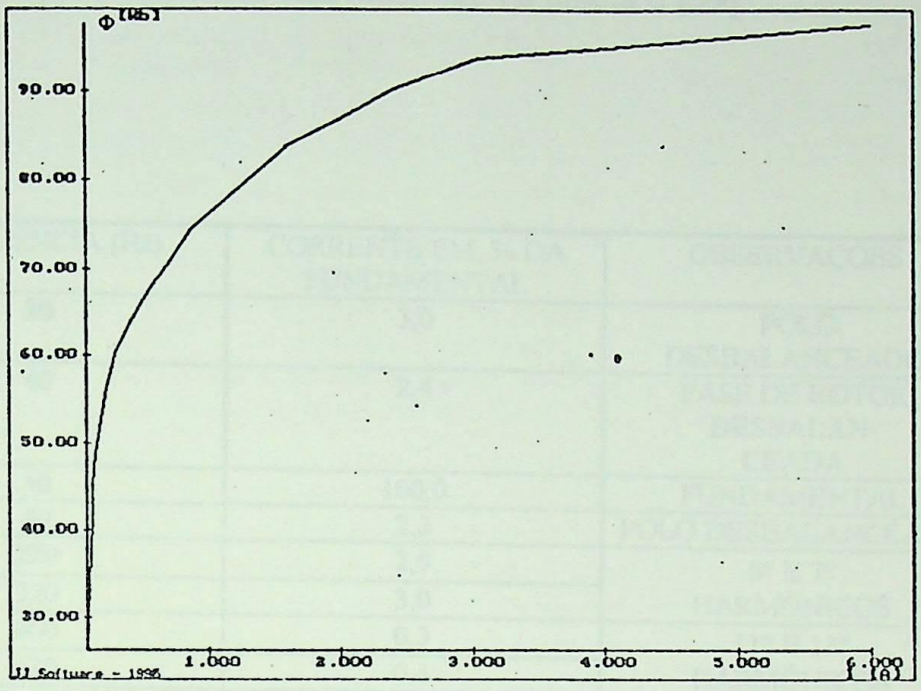


FIGURA 17- FLUXO DE UM TRANSFORMADOR EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO

A distorção da corrente em transformadores é significativa nos seguintes casos:

* Na madrugada, habitualmente, quando os transformadores estão subcarregados e as tensões mais elevadas;
* Durante a re-energização do transformador. O núcleo do transformador pode experimentar níveis extremos de saturação, oriundos da pre-existência de fluxo residual no núcleo. São gerados harmônicos pares e ímpares, por vários ciclos e com amplitudes variadas.
* Pela conexão ao transformador de uma carga que provoque assimetria da corrente de magnetização. Neste caso o conteúdo harmônico também possuirá componentes pares e ímpares.

4.1.4 - MOTORES DE INDUÇÃO

Colocam-se os motores de indução na categoria dos equipamentos que praticamente, não distorcem as formas de onda da corrente, pois considera-se a

operação do sistema onde o motor está conectado em condições normais de operação. Em condições *anormais*, os harmônicos com amplitudes variáveis no tempo estão presentes. Um exemplo de harmônicos de corrente típica, produzido por um motor de indução bobinado de 6 pólos, 50 [Hz], funcionando a uma velocidade de 90% da nominal está mostrado na tabela 6 [39].

FREQUÊNCIA (Hz)	CORRENTE EM % DA FUNDAMENTAL	OBSERVAÇÕES
20	3,0	POLO DESBALANCEADO
40	2,4	FASE DE ROTOR DESBALAN-CEADA
50	100,0	FUNDAMENTAL
80	2,3	POLO DESBALANCEADO
220	2,9	5° E 7° HARMÔNICOS
320	3,0	
400	0,3	11° E 13° HARMÔNICOS
520	0,4	

TABELA 6 - HARMÔNICOS DE CORRENTES TÍPICAS GERADAS POR UM MOTOR DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO [39]

4.1.5 - FORNOS A ARCO ELÉTRICO

As correntes de um forno são desbalanceadas, distorcidas e variam suas amplitudes a cada meio ciclo, ocorrência, não só do retardo do início mas também devido a resistência do arco ser não-linear (existem ainda outros fenômenos, tais como movimento aleatório do arco, sob a influência de forças eletromagnéticas, correntes de convecção e movimento dos eletrodos). A figura 18 mostra a forma de onda de um forno de uma siderúrgica.

A forma de onda da corrente apresentada na figura 18 tende a ser mais severa durante os primeiros 5 minutos de um ciclo de fusão, quando os eletrodos de grafite estão começando a fundir a carga. À medida que aumenta a quantidade de metal fundido, o arco torna-se mais curto e mais estável e, subseqüentemente o período de refino é caracterizado por correntes mais firmes, com distorção de menor amplitude relativa.

A tabela 7 apresenta resultados de uma análise de Fourier de correntes de forno, usada na especificação de filtros.

Verifica-se na tabela 7, selecionada para diversos intervalos de atividades (arco de 5 períodos consecutivos de 5 ciclos cada um até 30[Hz]). Os harmônicos de ordem mais baixa prevalecem, e harmônicos pares estão presentes, estes no

[A] e lâmpada de 40 [W] com reator de partida rápida, 127 [V] com corrente nominal de 0,943, respectivamente.

ORDEM DO HARMÔNICO	LÂMPADAS FLUORESCENTE DE 20 [W]		LÂMPADA FLUORESCENTE DE 40 [W] COM REATOR DE PARTIDA RÁPIDA	
	HARMÔNICO DE TENSÃO EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL	HARMÔNICO DE CORRENTE EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL	HARMÔNICO DE TENSÃO EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL	HARMÔNICO DE CORRENTE EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
1	100,0	100,0	100,0	100,0
2	0,284	0,002	0,227	0,001
3	1,095	0,043	1,063	0,112
4	0,165	0,002	0,128	0,001
5	1,173	0,006	1,731	0,026
6	0,015	0,001	0,000	0,001
7	0,012	0,004	0,190	0,006
8	0,000	0,001	0,000	0,000
9	0,000	0,001	0,000	0,004
10	0,000	0,000	0,000	0,001
11	0,000	0,001	0,000	0,003
12	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,001	0,000	0,001
14	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,002

TABELA 8- MEDIÇÃO DOS HARMÔNICOS DE TENSÃO E CORRENTE DE UMA LÂMPADA DE 20 [W] E LÂMPADA DE 40 [W] COM REATOR DE PARTIDA RÁPIDA

5 - EFEITOS DOS HARMÔNICOS

São vários os problemas causados por harmônicos de corrente nos sistemas e equipamentos elétricos. Resumidamente conforme ([29], [21], [1]) pode-se ter:

* Nos sistemas elétricos mesmo com níveis reduzidos de harmônicos em relação a fundamental, resultam em quedas de tensão significativas. As tensões ficarão distorcidas e por vezes desbalanceadas;
* A existência de defasagem entre os harmônicos de tensão e corrente, produzem um fator de potência muito baixo nas instalações elétricas;
* Sistemas elétricos que contenham harmônicos de corrente, podem induzir harmônicos de tensão em sistemas telefônicos, provocando ruídos;
* Distorção da tensão nos sistemas de alimentação dos conversores, interfere nos circuitos de disparo e controle;
* Nas máquinas rotativas, os harmônicos de tensão e corrente resultam no aumento de perdas nos enrolamentos do estator, circuitos do rotor e lâminas do estator e do rotor e também podem produzir um torque pulsante;
* Transformadores na presença de harmônicos aumentam as perdas por histeresse e correntes parasitas e amplia os esforços na isolação;

período de refino desaparecem e os harmônicos ímpares descrescem consideravelmente.

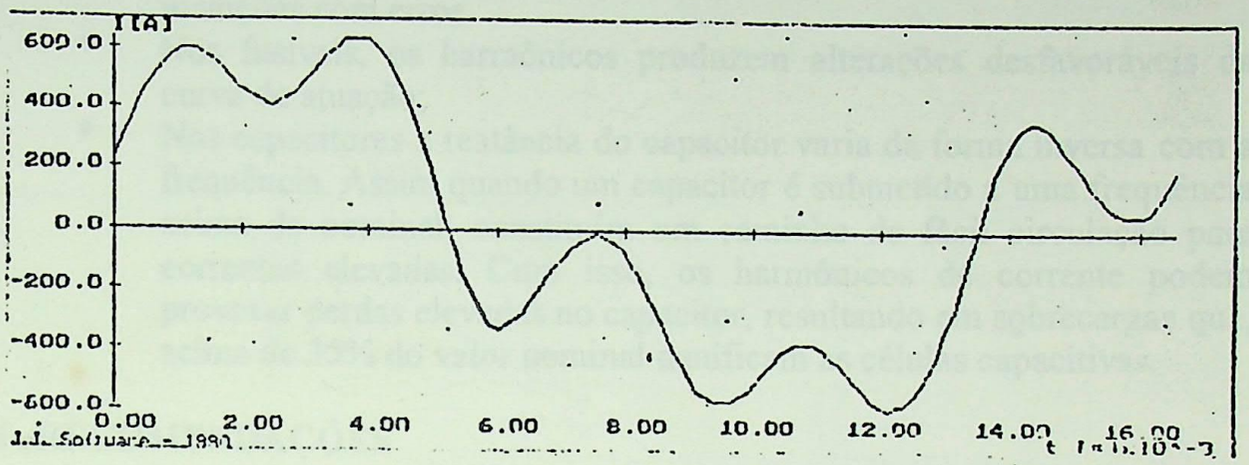


FIGURA 18- MOSTRA AS FORMAS DE ONDA DE UM FORNO A ARCO EM UMA SIDERÚRGICA [76]

CONDIÇÃO DO FORNO	HARMÔNICO DE CORRENTE (PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL)					
	ORDEM DO HARMÔNICO	2	3	4	5	7
FUSÃO INICIAL (ARCO ATIVO)		7,7	5,8	2,5	4,2	3,1
REFINO (ARCO ESTÁVEL)			2,0		2,1	

TABELA 7 - ILUSTRAÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO TÍPICO DE CORRENTE DE FORNO A ARCO, EM DOIS ESTÁGIOS DO CICLO DE FUSÃO [33]

4.1.6 - ILUMINAÇÃO FLUORESCENTE

Iluminação de descarga, tais como lâmpadas fluorescente, a vapor de mercúrio e a vapor de sódio de alta pressão, apresentam características totalmente não-lineares, e por isso distorcem as formas de onda da tensão e corrente. A tabela 8 mostra os harmônicos de tensão e corrente de uma lâmpada fluorescente de 20 [W] com reator de partida rápida, 127 [V] com corrente nominal de 0,825

* Os controladores de demanda, que usam a eletrônica digital são suscetíveis a má operação, devido a presença de harmônicos;
* Nos relés de proteção, os harmônicos podem alterar as características de operação;
* Os medidores de energia a disco de indução, resulta em grandes medições com erros.
* Nos fusíveis, os harmônicos produzem alterações desfavoráveis da curva de atuação;
* Nos capacitores a reatância do capacitor varia de forma inversa com a frequência. Assim quando um capacitor é submetido a uma frequência acima da nominal, constituíra um caminho de fácil circulação para correntes elevadas. Com isso, os harmônicos de corrente podem provocar perdas elevadas no capacitor, resultando em sobrecargas que, acima de 35% do valor nominal danificam as células capacitivas.

6- RECOMENDAÇÕES

O aumento considerável de cargas não-lineares, que provocam distúrbios nos sistemas elétricos, fez com que orgãos responsáveis pela legislação tomassem providências para limitar as distorções devido aos harmônicos de corrente e tensão.

Aqui serão apresentadas a recomendação do IEEE [33] e a recomendação brasileira sobre as distorções devido os harmônicos.

6.1- RECOMENDAÇÃO DO IEEE Sd 519-1992

As tabelas 9, 10 e 11 mostram os limites de distorção da tensão e corrente da recomendação do IEEE std 519-1992 [33].

TENSÃO NO PAC	LIMITE DA DISTORÇÃO INDIVIDUAL DA TENSÃO(%)	LIMITE DA DISTORÇÃO TOTAL DA TENSÃO(%)
69[kV] E ABAIXO	3,0	5,0
69,001[kV] E ATÉ 161[kV]	1,5	2,5
161,001[kV] E ACIMA	1,0	1,5

TABELA 9- LIMITE DA DISTORÇÃO DA TENSÃO DA RECOMENDAÇÃO DO IEEE [33]

onde:

PAC - Ponto de acoplamento entre o consumidor e a concessionária de energia.

A recomendação do IEEE limita a distorção total dos harmônicos no PAC, sem levar em consideração cada consumidor individualmente.

Recomendação dessa natureza dão ao primeiro consumidor uma grande vantagem com relação aos demais, já.que o limite admissível de distorção que este pode proporcionar ao PAC, é maior que os outros.

Como exemplo, consideram-se três consumidores que tenham cargas elétricas especiais, as quais produzem distorção no PAC. Tem-se que para uma barra de 69 [kV] uma distorção máxima de 5%. O primeiro consumidor provocou uma distorção de 1,5%, o segundo uma distorção de 2,4% e o terceiro a se instalar, uma distorção de 1,1%, logo os 5% admissível para o PAC é atingido. Se um quarto consumidor for instalar um equipamento, ele não poderia adicionar qualquer distorção a esse PAC, conseqüentemente seus investimentos na incorporação de filtros de harmônicos nas suas instalações seria elevado.

DISTORÇÃO DO HARMÔNICO DE CORRENTE MÁXIMA EM PERCENTAGEM DE I_L						
	ORDEM HARMÔNICA INDIVIDUAL					
I_{SC} / I_L	< 11	11≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23≤ h < 35	≤ 35	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

TABELA 10- MOSTRA O LIMITE DE DISTORÇÃO DA CORRENTE PARA SISTEMA DE 120 [V] ATÉ 69 [kV] DA RECOMENDAÇÃO DO IEEE [33]

onde:

I_{SC} - Corrente de curto-circuito do PAC;
I_L - Demanda máxima de corrente da carga para o PAC;
TDD - Fator de distorção total da corrente.

DISTORÇÃO DO HARMÔNICO DE CORRENTE MÁXIMA EM PERCENTAGEM DE I_L						
	ORDEM HARMÔNICA INDIVIDUAL					
I_{SC} / I_L	< 11	11≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23≤ h < 35	≤ 35	TDD
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20< 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50< 100	5,0	2,25	2;0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

TABELA 11- MOSTRA O LIMITE DE DISTORÇÃO DA CORRENTE PARA SISTEMA DE 69 [kV] ATÉ 161[kV] SEGUNDO A RECOMENDAÇÃO DO IEEE [33]

6.2- RECOMENDAÇÃO BRASILEIRA [69]

No Brasil, até os dias de hoje, não existe normas oficiais para limitação da distorção da tensão e corrente. Entretanto, o GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, através da "Comissão de Estabelecimento de Normas e Critérios" que busca implantar alguns índices normativos para o sistema de suprimento a cargas de consumidores especiais (vide tabelas 12 e 13).

Estes critérios e procedimentos fornecem elementos que permitem à concessionária avaliar a qualidade de serviço quanto ao nível de harmônicos, controlar as perturbações causadas pelas cargas não-lineares em operação e quantificar o impacto da instalação ou ampliação de cargas que distorcem as formas de onda da tensão e corrente no horizonte de planejamento, identificando a necessidade de medidas corretivas. Além disso, possibilita aos consumidores adequarem os seus equipamentos e sistemas de processos ao padrão de serviço garantido pela concessionária.

6.2.1- RESPONSABILIDADE

O controle dos níveis de harmônicos nos sistemas elétricos é de interesse de todas as partes envolvidas, ou seja, consumidor, a concessionária e o fabricante dos equipamentos que distorcem as formas de onda.

Como regra para manter o relacionamento entre consumidor e concessionária, a instalação de uma nova carga com características especiais em conjunto com a instalação existente, deve ser tratada da mesma forma que uma carga nova, ou seja:

AMPLIAÇÃO DE CARGA + CARGAS EXISTENTES = CARGA NOVA

6.2.2- RESPONSABILIDADES DAS PARTES ENVOLVIDAS [69]

As partes envolvidas possuem responsabilidades para que se possa ao máximo minimizar os níveis de harmônicos. As partes envolvidas são:

a - As concessionárias de energia elétrica;
b - Os consumidores com cargas especiais;
c - Os consumidores em geral;
d - Os fabricantes de equipamentos causadores das distorções e os fabricantes de equipamentos sensíveis às distorções.

a- *Compete as concessionárias de energia elétrica*

a.1- Fornecer dados sobre o seu sistema elétrico, para estudos do consumidor aos anos posteriores;
a.2- Analisar e aprovar a conexão de novos consumidores com base mas características de cargas especiais e nos projetos de medidas mitigadoras apresentadas pelo consumidor.
a.3- Verificar se a conexão de uma nova carga especial causará transtornos a consumidores existentes e tomar providências no sentido de evitá-los;
a.4- Aplicar os critérios de conexão (limites de tensão e corrente) no ponto de entrega dos novos consumidores;

a.5- Preservar os interesse das concessionárias interligadas ou supridoras para que os seus sistemas elétricos não venham a sofrer transtornos quando da conexão de cargas especiais no seu sistema;
a.6- Monitorar e garantir um nível aceitável de harmônicos no seu sistema elétrico (nível de compatibilidade).
a.7- Arcar com medidas mitigadoras caso o consumidor atenda os critérios estabelecidos pela concessionária e o sistema elétrico venha a sofrer modificações não previstas.
a.8- Arcar com medidas mitigadoras para a manutenção dos níveis de harmônicos dentro dos limites aceitáveis, quando for de sua responsabilidade.
a.9- Exigir do consumidor, sempre que julgar necessário, comprovação de que as correntes geradas estão de acordo com as fornecidas na fase de projeto e que os equipamentos de mitigação encontram-se em operação e dentro das especificações.

b- *Compete a Consumidores com cargas especiais*

b.1- Atender os critérios aplicados pela concessionária;
b.2- Fornecer os dados a respeito da carga, solicitados pela concessionária;
b.3- Estudar e projetar os equipamentos de mitigação necessários;
b.4- Submeter tais projetos à avaliação da concessionária.

c- *Compete a Consumidores em geral*

Especificar todos os seus equipamentos de forma coerente com o nível de compatibilidade convencionado.

d- *Compete aos Fabricante das cargas especiais*

d.1- Desenvolver equipamentos com susceptibilidade coerente com o nível de compatibilidade convencionado;
d.2- Conter a emissão de harmônicos de corrente de seus equipamentos, através de medidas mitigadoras, de modo a evitar a proliferação dos harmônicos.

6.2.3- LIMITES [69]

Os limites aqui estabelecidos são aplicáveis à conexão de consumidores causadores de distorção devido aos harmônicos em redes de transmissão e subtransmissão (com tensões iguais ou superiores a 13,8 [kV]), bem como aos equipamentos especiais das próprias concessionárias.

Os limites podem ser globais ou individuais. Os limites globais são os valores máximos estabelecidos para os harmônicos de tensão e distorção total em qualquer barra do sistema elétrico, causada pela operação conjunta de todos os consumidores e equipamentos da própria concessionária, serve como garantia da qualidade da tensão fornecida aos consumidores. A partir dos harmônicos

Biblioteca MAUÁ BIM de Irajubá

existente de cada consumidor, deve ser realizado uma avaliação exata dos níveis globais dos harmônicos após a entrada de uma nova carga elétrica especial. De modo a simplificar e viabilizar essa avaliação, estabeleceu-se o conceito de limites por consumidor, como sendo os valores máximos admissíveis para os harmônicos de tensão e distorção total dos harmônicos provocados no sistema elétrico da concessionária por um único consumidor.

A distorção total dos harmônicos é a somatória quadrática dos harmônicos de tensão da ordem 2 a 50. Esse conceito procura quantificar o teor de "poluição devido aos harmônicos" total existente em um determinado ponto do sistema, e pode ser dado pela equação abaixo:

$$FDu = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} (FDu_n)^2} \quad \text{em (\%)} \qquad (17)$$

onde:

FDu - Fator de distorção total da tensão;

n - Ordem do harmônico;

FDu_n - $(100.\frac{U_n}{U_1})$ - Distorção do harmônico de tensão de ordem n em porcentagem da fundamental.

A tabela 12 apresenta os limites globais para os harmônicos de tensão individuais e para a distorção total. Esses limites não devem ser excedidos em nenhum ponto do sistema elétrico.

U < 69 [kV]				U > 69 [kV]			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	FDu_n (%)	ORDEM	FDu_n (%)	ORDEM	FDu_n (%)	ORDEM	FDu_n (%)
3,5,7	5	2,4,6	2	3,5,7	2	2,4,6	1
9,11,13	3			9,11,13	1,5		
15 A 25	?	>8	1	15 A 25	1	≥8	0,5
≥27	1			≥27	0,5		
FDu = 6 (%)				FDu = 3 (%)			

TABELA 12- LIMITES GLOBAIS DE TENSÃO EXPRESSOS EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL [69]

A tabela 13 apresenta os limites por consumidor para os harmônicos de tensão individual e para distorção total dos harmônicos. Esses limites devem ser aplicados no ponto de entrega como parte dos critérios de conexão.

U < 69 [kV]				U > 69 [kV]			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	FDu_n (%)	ORDEM	FDu_n (%)	ORDEM	FDu_n (%)	ORDEM	FDu_n (%)
3 A 25	1,5	TODOS	0,5	3 A 25	0,6	TODOS	0,3%
≥ 27	0,7			≥ 27	0,4		
FDu =3 (%)				FDu = 1,5 (%)			

TABELA 13- LIMITES DE TENSÃO POR CONSUMIDOR EXPRESSOS EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL [69]

A conexão de uma carga não-linear está condicionada também ao atendimento aos limites dos harmônicos de corrente injetados no ponto de entrega do consumidor.

Esses limites de corrente devem ser estabelecidos pela concessionária, com base em estudos de penetração de harmônicos em sua rede, de forma a evitar que os limites de tensão por consumidor não sejam excedidos aos demais pontos do sistema, e não apenas no ponto de entrega.

CAPÍTULO IV

CONEXÕES DOS BANCOS DE CAPACITORES

CONEXÕES DOS BANCOS DE CAPACITORES

1- INTRODUÇÃO

Ao se definir pela necessidade de instalação de bancos de capacitores, um dos estudos a ser realizado é o tipo de conexão do banco de capacitores.

Os bancos de capacitores trifásicos são geralmente formados por conexões de capacitores monofásicos, sendo muitas as combinações em que variam o número, a potência e a tensão nominal dos capacitores individuais, o número de capacitores em paralelo por grupo e o número de grupos série por fase. Estas conexões visam obter os valores de tensão e a potência do banco de capacitores.

Ao se projetar um banco de capacitores, deverão ser considerados diversos fatores, entre eles:

- Potência dos capacitores individuais;
- Número de capacitores paralelos por grupo;
- Número de grupos série;
- Tipo de proteção dos capacitores;
- Tipo de proteção do banco;
- Tipo de conexão das fases do banco.

Os tipos de ligações das fases do banco ou tipos de conexões para bancos, basicamente, podem ser:

* Conexão em triângulo (delta);
* Conexão em estrela não aterrada (isolada);
* Conexão em estrela aterrada;
* Dupla estrela com neutro único isolado;
* Dupla estrela com neutro único aterrado.

As figuras 1, 2, 3, 4 e 5 mostram os esquemas das conexões típicas.

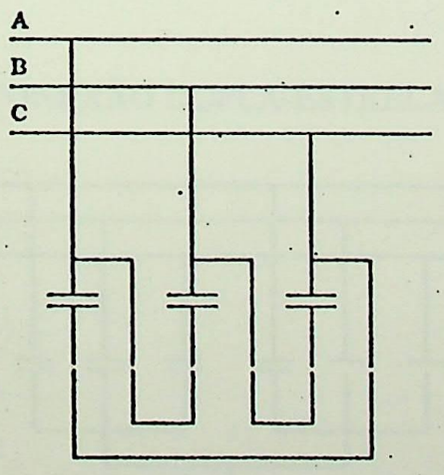


FIGURA 1- CONEXÃO DELTA

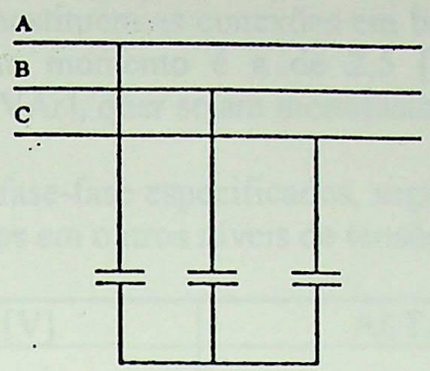


FIGURA 2- CONEXÃO ESTRELA-ISOLADA

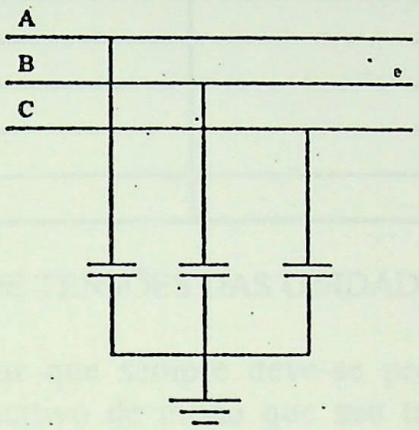


FIGURA 3- CONEXÃO ESTRELA-ATERRADA

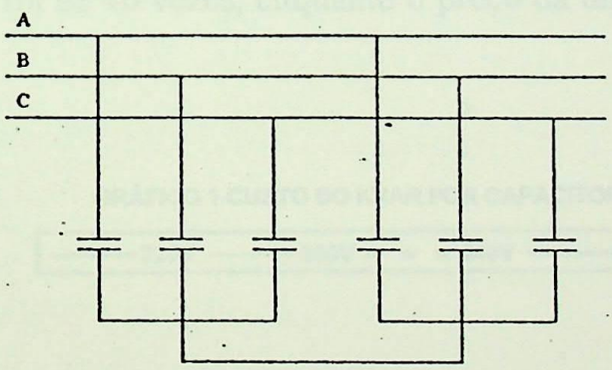


FIGURA 4- CONEXÃO DUPLA-ESTRELA-ISOLADA

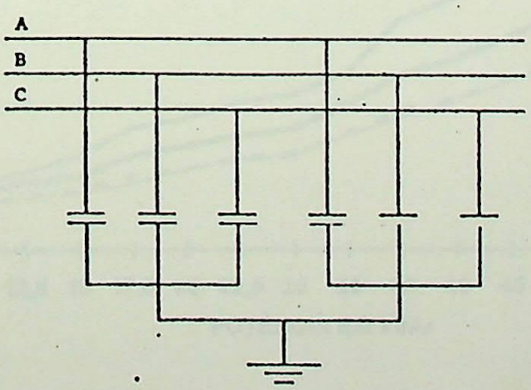


FIGURA 5- CONEXÃO DUPLA-ESTRELA-ATERRADA

Os capacitores que constituem as conexões em baixa tensão (<1000 [V]), a menor unidade adotada no momento é a de 2,5 [kVAr] e as maiores não costumam superar os 50 [kVAr], quer sejam monofásicas ou trifásicas (valores de potência a 60 [Hz]) [46].

Os níveis de tensões fase-fase especificados, segundo [8], seguem na tabela 1, mas podem ser fornecidos em outros níveis de tensões.

BAIXA TENSÃO [V]	ALTA TENSÃO [V]
220	2300
380	3810
440	4800
	6600
	7620
	7960
	13200
	13800

TABELA 1- NÍVEIS DE TENSÕES DAS UNIDADES CAPACITIVAS [8]

É importante informar que sempre deve-se preencher uma caixa com o máximo de elemento capacitivo de modo que seu tamanho e custo fiquem os menores possíveis, observe o gráfico da figura 6 e a tabela 2. Por exemplo, para a tensão de 480 [V], na tabela 2, o crescimento da potência da unidade capacitiva de 2,5 a 100 [kVAr] foi de 40 vezes, enquanto o preço da unidade neste intervalo foi de 15 vezes.

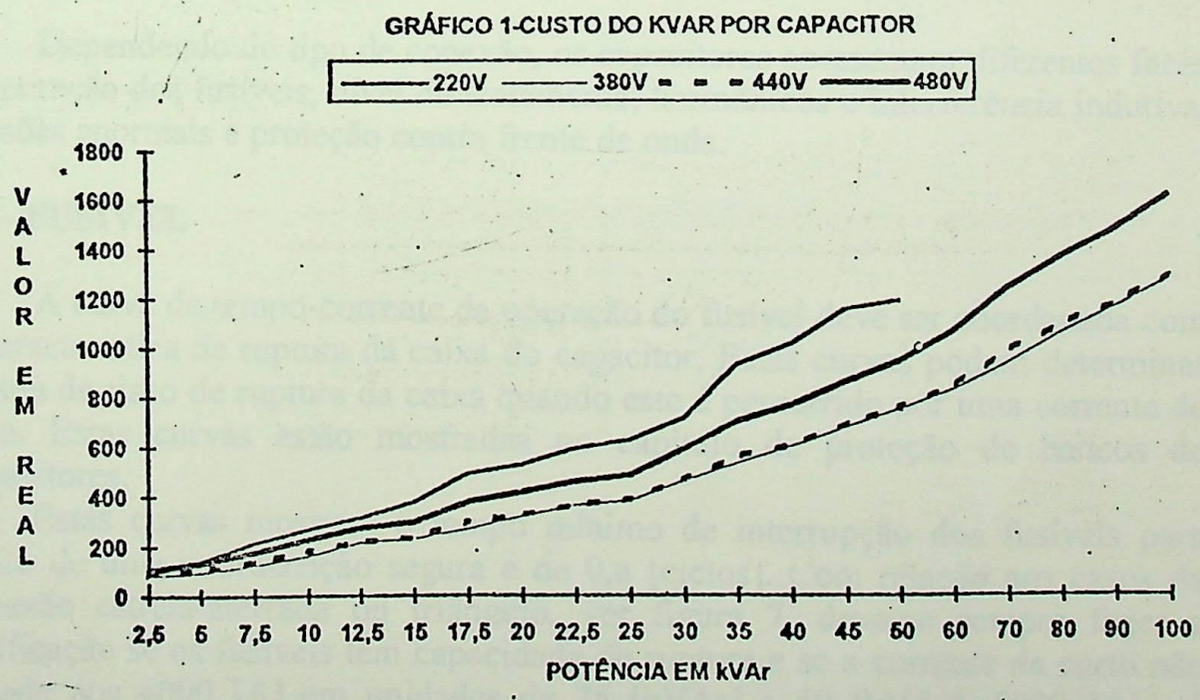


FIGURA 6- RELAÇÃO DO PREÇO DA UNIDADE CAPACITIVA COM A POTÊNCIA E TENSÃO [72]

A regra básica para a escolha da conexão de um banco de capacitores, é influenciada pela configuração do sistema (aterrado ou não). Mas a escolha da conexão do banco, pode sofrer alterações, devido a outros fatores: Harmônicos, interferência indutiva, operação do fusível, nível de isolamento, proteção e problemas de ressonância.

TENSÕES	220 [V]	380 [V]	440 [V]	480 [V]
POTÊNCIA	VALORES EM REAIS (R$)			
2,5	95,81	83,33	83,71	104,64
5,0	141,12	96,96	107,04	133,92
7,5	214,17	126,33	141,60	177,60
10,0	269,08	163,77	181,92	227,52
12,5	314,49	217,15	218,88	274,08
15,0	375,26	230,20	235,20	295,68
17,5	492,95	269,47	299,52	378,71
20,0	527,99	322,56	325,05	418,79
22,5	593,37	367,77	360,44	460,79
25,0	626,78	383,03	389,18	486,71
30,0	715,19	467,03	468,28	590,39
35,0	932,20	534,14	559,67	699,83
40,0	1016,05	604,12	606,71	769,91
45,0	1153,42	682,55	691,29	863,99
50,0	1190,38	752,63	756,95	946,55
60,0	--x--	831,35	842,87	1065,58
70,0	--x--	940,11	984,95	1238,38
80,0	--x--	1062,70	1089,58	1363,18
90,0	--x--	1159,66	1175,02	1468,78
100,0	--x--	1276,78	1287,34	1612,70

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

TABELA 2- CUSTO DOS CAPACITORES COM RELAÇÃO A POTÊNCIA [72]
(1R$= U$1,093 em agosto de 1995)

2- FATORES QUE ENVOLVEM AS CONEXÕES

Dependendo do tipo de conexão, os capacitores apresentam diferentes faces a operação dos fusíveis, nível de isolamento, harmônicos e interferência indutiva, tensões anormais e proteção contra frente de onda.

2.1- FUSÍVEL

A curva de tempo-corrente da operação do fusível deve ser coordenada com a característica de ruptura da caixa do capacitor. Estas curvas podem determinar o grau de risco de ruptura da caixa quando este é percorrido por uma corrente de falta. Estas curvas estão mostradas no capítulo de proteção de bancos de capacitores.

Estas curvas mostram o tempo mínimo de interrupção dos fusíveis para efeito de uma coordenação segura é de 0,8 [ciclos]. Com relação aos casos da conexão estrela-aterrada ou triângulo, ver figura 7, deve-se sempre fazer a verificação se os fusíveis têm capacidade de ruptura e se a corrente de curto não excede aos 4000 [A] em unidades de 25 [kVAr] e 50 [kVAr], 5000 [A] em unidades de 100 [kVAr] ou 6000 [A] para unidades maiores [46], caso contrário,

usa-se fusíveis limitadores de corrente, ou então rearranja-se o banco de modo a ter, em cada fase, grupos séries, ou então ainda alterar a conexão do banco de capacitores.

Deve-se ter em mente que a corrente que atravessa o fusível, não deve ser menor que 10 vezes a corrente nominal [46] para uma atuação segura. O banco de capacitores ligado em estrela-isolada, é um caso da conexão que possui o seguinte problema: quando ocorre uma falta (curto-circuito) em uma das fases (ver figura 8) de um banco de capacitores equilibrado possuindo um capacitor por fase, a corrente máxima que percorre esta fase após a falta é de 3 vezes a corrente nominal da fase antes da falta, visto que, as outras fases boas limitam a corrente de curto-circuito na fase defeituosa. A figura 9 mostra o comportamento das corrente nas fases boas, e a figura 10 mostra o diagrama resultante.

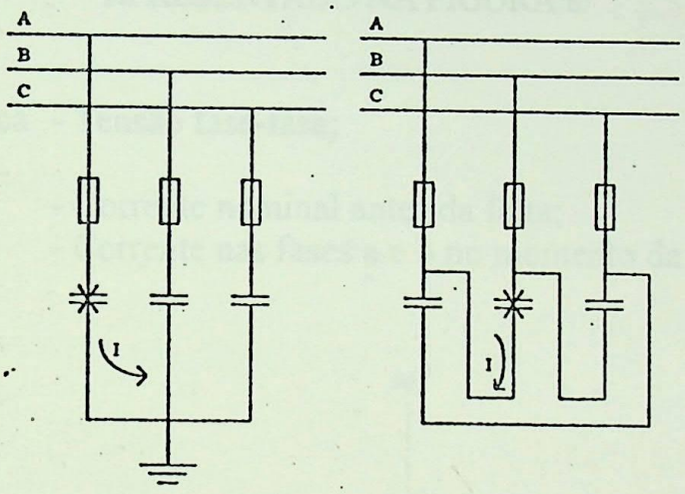


FIGURA 7- CONEXÃO ESTRELA-ATERRADA E TRIÂNGULO NO MOMENTO DA FALTA

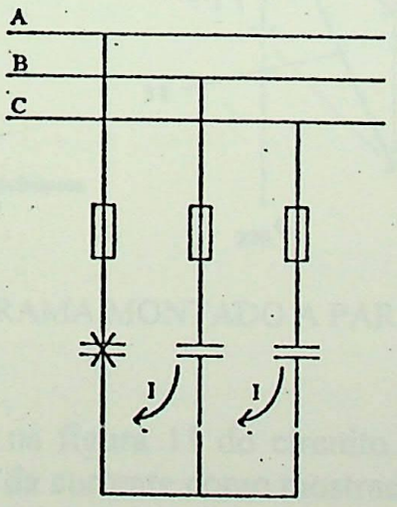


FIGURA 8- CONEXÃO ESTRELA-ISOLADA NO MOMENTO DA FALTA

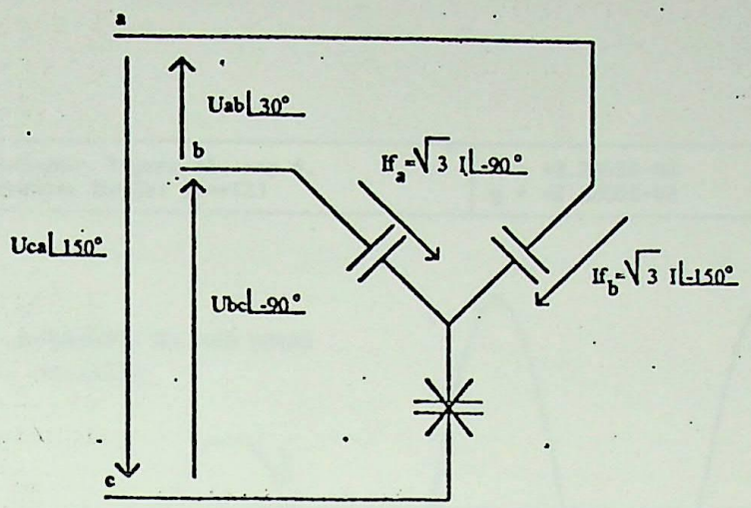


FIGURA 9- GRÁFICO MOSTRANDO O RESULTADO DO PROBLEMA APRESENTADO NA FIGURA 8

onde:

Uab, Ubc, Uca - Tensão fase-fase;

I - Corrente nominal antes da falta;

If$_a$, If$_b$ - Corrente nas fases a e b no momento da falta.

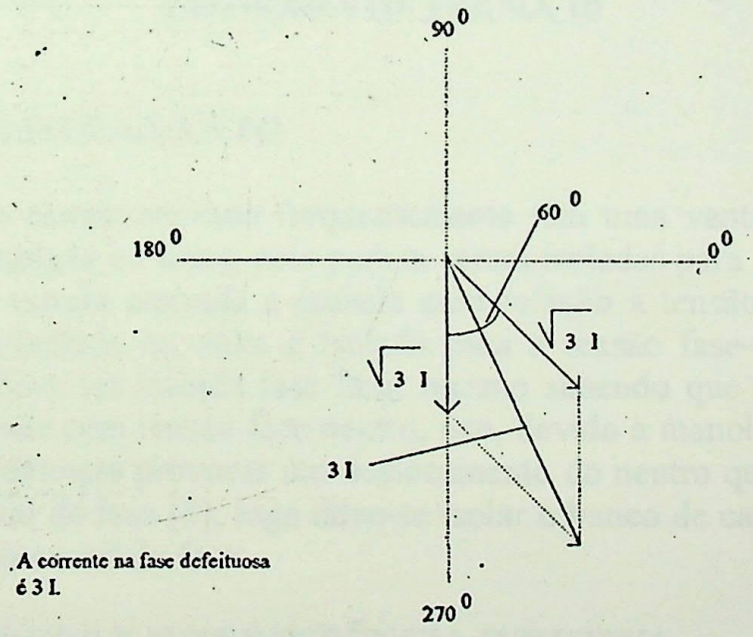


FIGURA 10- DIAGRAMA MONTADO A PARTIR DA FIGURA 9

A simulação ilustrada na figura 11 do circuito da figura 8 (ver anexo 8) comprova o comportamento da corrente como mostrado na figura 10.

Deve-se ter o cuidado de observar a localização do banco de capacitores no sistema. Bancos de capacitores em delta ou estrela-aterrada perto de subestações ou de fontes de baixa impedância, podem ser perigosos para a não atuação correta do fusível.

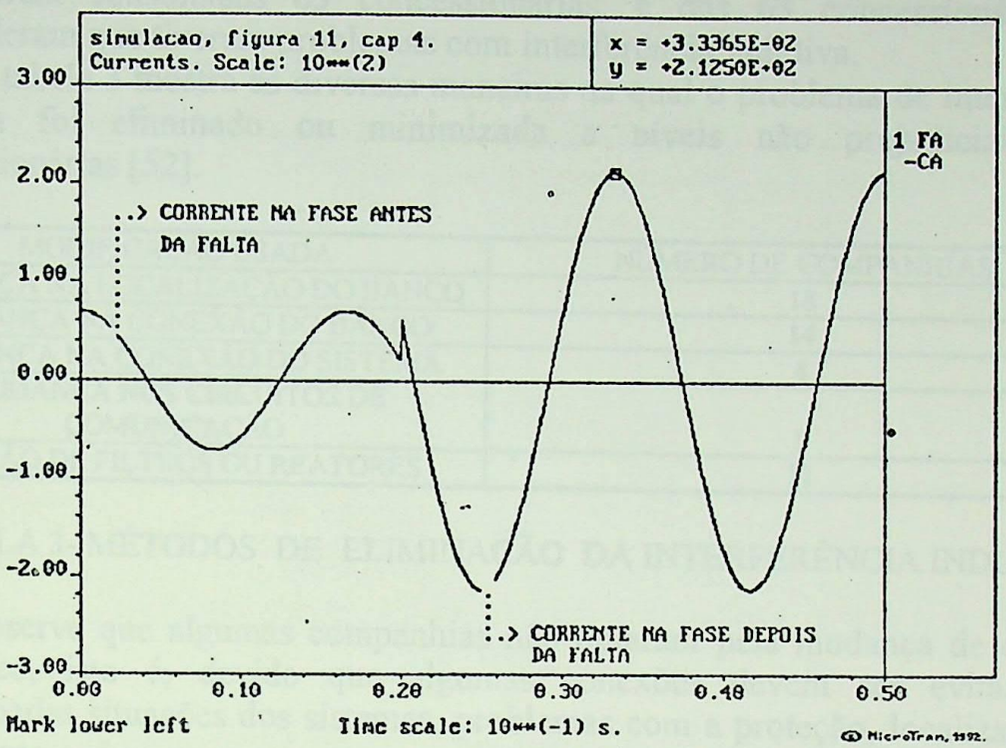


FIGURA 11- SIMULAÇÃO DO CASO DA FIGURA 8, PARA COMPROVAÇÃO DO DIAGRAMA DA FIGURA 10

2.2- NÍVEL DE ISOLAMENTO

A conexão estrela-aterrada frequentemente têm uma vantagem econômica sobre a estrela-isolada ou delta, pois podem serem isoladas para níveis de tensões mais baixas. A estrela aterrada é isolada com relação a tensão fase-neutro e a conexão estrela-isolada ou delta é isolada para a tensão fase-fase. A conexão estrela-isolada deve ser isolada fase-fase, mesmo sabendo que esta trabalhe em regime permanente com tensão fase-neutro, isto, devido a manobras e eliminação de unidades defeituosas provocar um deslocamento do neutro que, pode atingir o valor do potencial de fase [3], logo deve-se isolar o banco de capacitores estrela-isolada para o potencial de fase.

2.3- HARMÔNICOS E INTERFERÊNCIA INDUTIVA

A conexão estrela-aterrada pode causar interferência indutiva nos sistemas de comunicação, especialmente quando nos postes da rede de distribuição estão presentes os sistemas de potência e comunicação. O banco de capacitores não gera, mas produz um caminho para os harmônicos de terceira ordem. A conexão delta ou estrela-isolada não propicia este caminho.

As frequências predominantes na qual podem causar interferência nos sistemas de comunicação são os harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos ímpares (nono, décimo-quinto etc.). Destes, o terceiro é o mais predominante.

Uma pesquisa realizada nos Estados Unidos em 1959 com algumas companhias do país, revelaram uma preocupação das concessionárias com a interferência indutiva [52].

Foram consultadas 63 concessionárias, e das 63 concessionárias, 62 responderam que tiveram problemas com interferência indutiva.

A tabela 3 mostra as diversas maneiras na qual o problema de interferência indutiva foi eliminado ou minimizada a níveis não prejudiciais pelas concessionárias [52].

MODIFICAÇÃO USADA	NÚMERO DE COMPANHIAS
MUDANÇA NA LOCALIZAÇÃO DO BANCO	18
MUDANÇA NA CONEXÃO DO BANCO	14
MUDANÇA NA CONEXÃO DO SISTEMA	4
MUDANÇA NOS CIRCUITOS DE COMUNICAÇÃO	3
ADIÇÃO DE FILTROS OU REATORES	11

TABELA 3- MÉTODOS DE ELIMINAÇÃO DA INTERFERÊNCIA INDUTIVA

Observe que algumas companhias não optaram pela mudança de conexão do banco, isto é, devido que algumas conexões devem ser evitadas em determinadas situações dos sistemas, problemas com a proteção, localização dos bancos, ressonância, etc.

2.4- TENSÕES ANORMAIS

Deve-se fazer a conexão do banco de capacitores de acordo com a configuração do sistema (aterrado ou não), para que se possa ao máximo evitar o problema de ressonância, entre o banco de capacitores e outros equipamentos do sistema.

Observe o sistema da figura 12, na qual pode acontecer que um ou dois condutores do sistema sejam partidos ou uma ou duas chaves do sistema não fechem o circuito entre a fonte e o banco de capacitores, neste caso, ocorrerá o fenômeno de ressonância entre o banco de capacitores e uma carga qualquer do sistema. Iremos analisar o caso da figura 12.

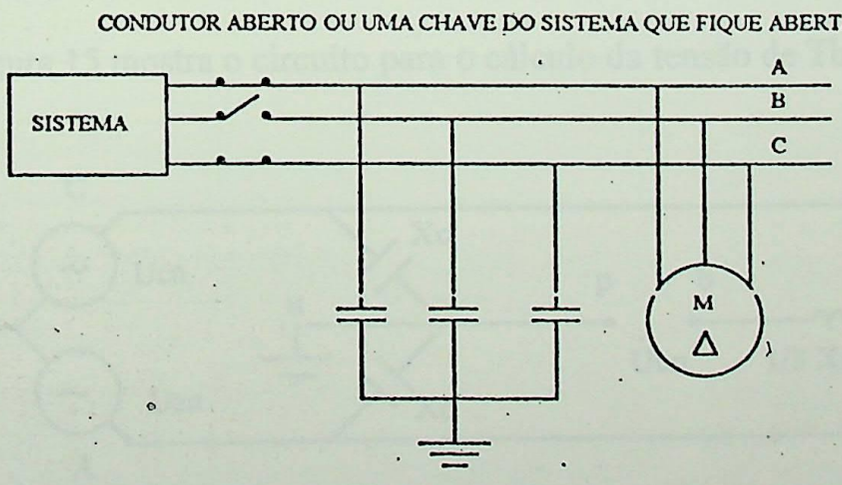


FIGURA 12- ESQUEMA DO PROBLEMA DE RESSONÂNCIA

O diagrama trifilar, na situação em que um condutor ou uma chave seccionadora, por razão de defeito, é aberto, está indicado na figura 13, onde supõe-se a abertura na fase b.

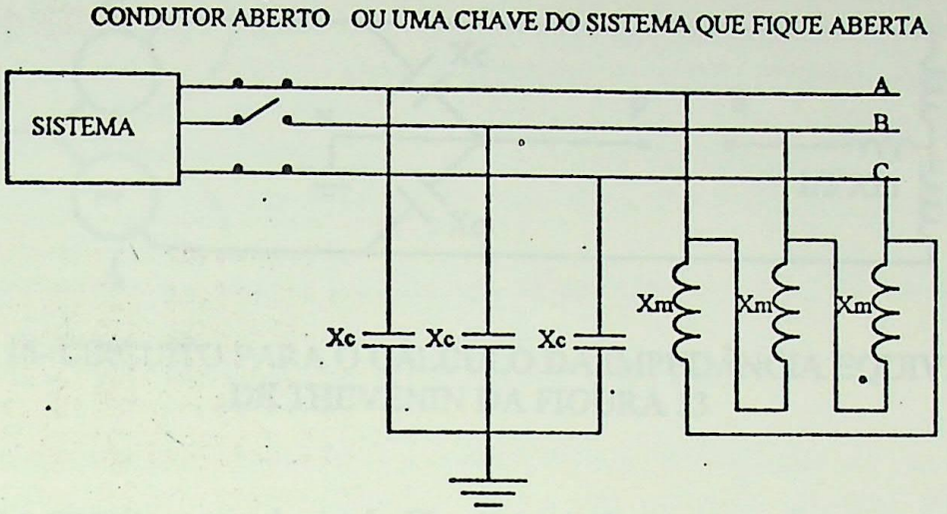


FIGURA 13- SISTEMA TRIFILAR CORRESPONDENTE A FIGURA 12 COM UM CONDUTOR ABERTO

A tensão equivalente de Thevenin é obtida pelo cálculo da tensão existente entre os pontos b e p, retirando-se o elemento existente entre estes pontos. A figura 14 ilustra o circuito.

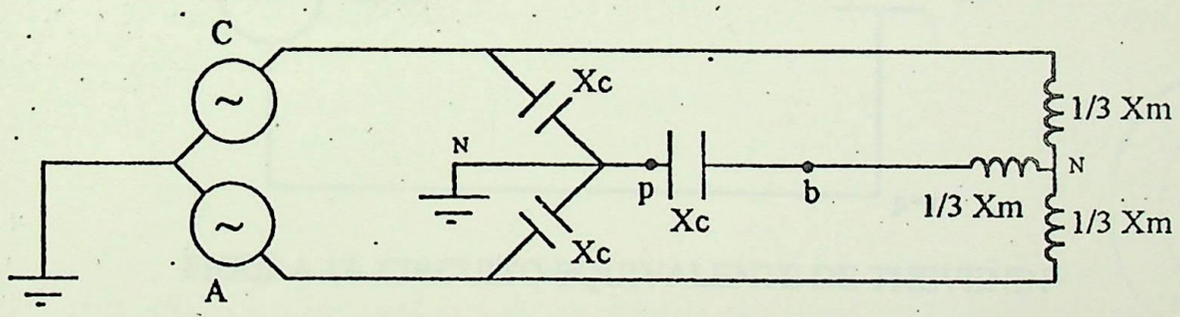


FIGURA 14- CIRCUITO EQUIVALENTE AO CIRCUITO DA FIGURA 13

A figura 15 mostra o circuito para o cálculo da tensão de Thevenin, U_{TH}.

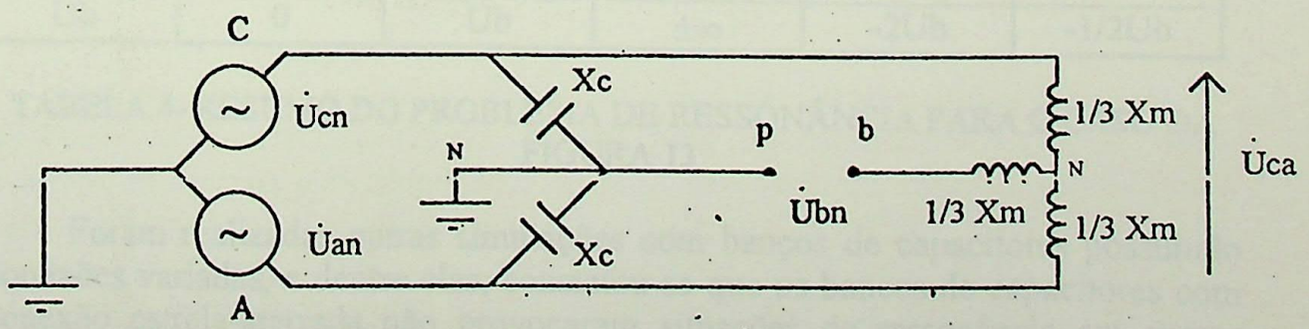


FIGURA 15- CÁLCULO DA TENSÃO DE THEVENIN DA FIGURA 13

A impedância equivalente de Thevenin do circuito vista dos pontos b e p é ilustrada na figura 16.

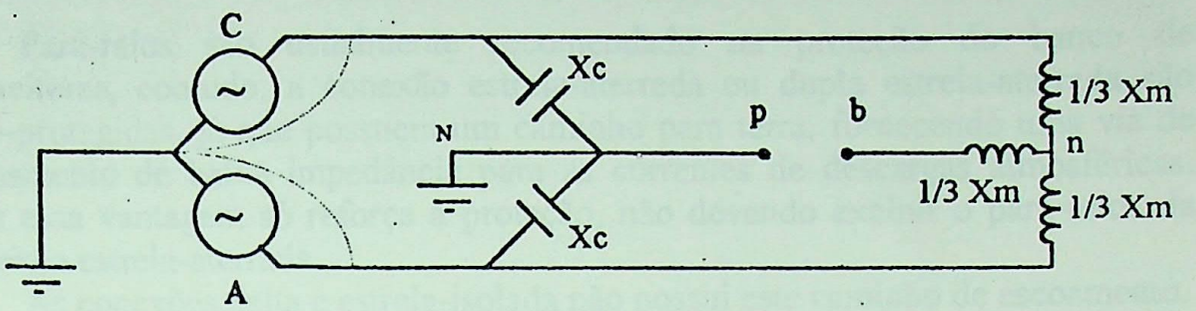


FIGURA 16- CIRCUITO PARA O CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE THEVENIN DA FIGURA 13

Logo o circuito equivalente de Thevenin será:

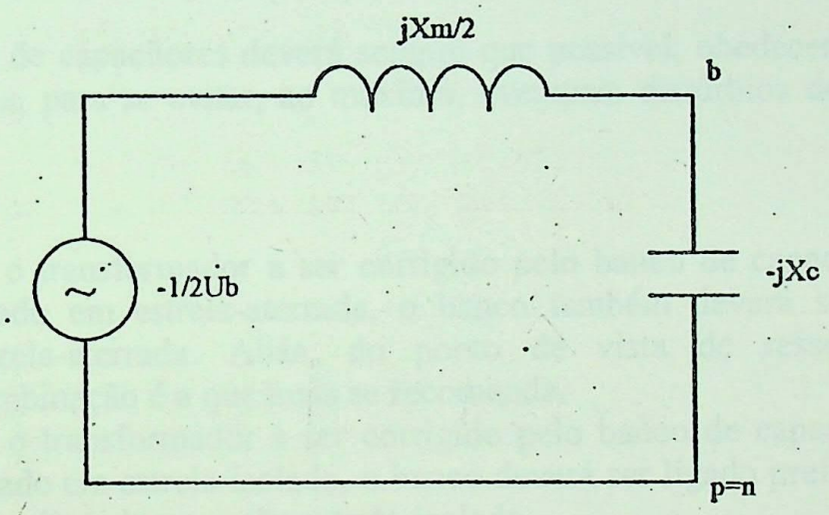


FIGURA 17- CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN

Biblioteca MAUÁ BIM de Engenharia de Irajubá - EFEI

Logo para o caso de ressonância na fase b, tem-se a tabela 4:

TABELA RESUMO					
XC/XM	0	1/3	1/2	2/3	∞
Ub	0	Ub	±∞	-2Ub	-1/2Ub

TABELA 4- RESUMO DO PROBLEMA DE RESSONÂNCIA PARA O CASO DA FIGURA 13

Foram realizadas outras simulações com bancos de capacitores possuindo conexões variadas, e dentre elas, constatou-se que os bancos de capacitores com conexão estrela-aterrada não provocaram situações de ressonância em cargas

aterradas e nos sistema aterrados. Mas para outros tipos de conexões a ressonância não foi evitada.

2.5- PROTEÇÃO CONTRA FRENTE-DE-ONDA

Pará-raios são usualmente recomendado na proteção do banco de capacitores, contudo, a conexão estrela-aterrada ou dupla estrela-aterrada são auto-protegidas, já que possuem um caminho para terra, fornecendo uma via de escoamento de baixa impedância para as correntes de descargas atmosféricas. Mas essa vantagem só reforça a proteção, não devendo excluir o pará-raios da conexão estrela-aterrada.

As conexões delta e estrela-isolada não possui este caminho de escoamento.

2.6- CONEXÃO DO SISTEMA (ATERRADO OU NÃO)

Uma recomendação geral para a conexão é a verificação do sistema de alimentação; antes de se determinar a forma de conexão de um banco de capacitores é preciso verificar se o neutro do sistema de alimentação é aterrado ou não.

O banco de capacitores deverá sempre que possível, obedecer as seguintes recomendações, para se evitar, ao máximo, eventuais distúrbios de ressonância série [46]:

* Se o transformador a ser corrigido pelo banco de capacitores estiver ligado em estrela-aterrada, o banco também deverá ser ligado em estrela-aterrada. Aliás, do ponto de vista de ressonância, esta combinação é a que mais se recomenda.
* Se o transformador a ser corrigido pelo banco de capacitores estiver ligado em estrela-isolada, o banco deverá ser ligado preferencialmente em triângulo ou então estrela-isolada.
* Se o transformador a ser corrigido pelo banco de capacitores estiver ligado em triângulo, o banco deverá ser ligado preferencialmente em estrela-isolada, ou senão em triângulo.
* Para a escolha da conexão do banco capacitivo, a dupla-estrela é enquadrada na condição de estrela-isolada, e para a conexão dupla-estrela-aterrada é considerada como estrela-aterrada.

Sistemas que possuam o neutro isolado, não devem possuir bancos de capacitores com a conexão estrela-aterrada, pois os mesmos, proporcionariam um caminho de retorno para a corrente de falta fase-terra do sistema, e assim este aterramento intencional devido a instalação de um banco de capacitores poderá provocar problemas relativos a corrente de falta, neste caso, a um aumento da corrente de falta em relação ao caso da não existência do banco de capacitores aterrado, também poderá surgir níveis de sobretensões nas fases não atingidas

pela falta. Na prática as tensões transitórias podem atingir de 3 a 3,5 vezes a tensão fase-terra do sistema [72]. A simulação da figura 19 (ver anexo 9) mostra as sobretensões nas fases não sujeita a falta, para o sistema da figura 18.

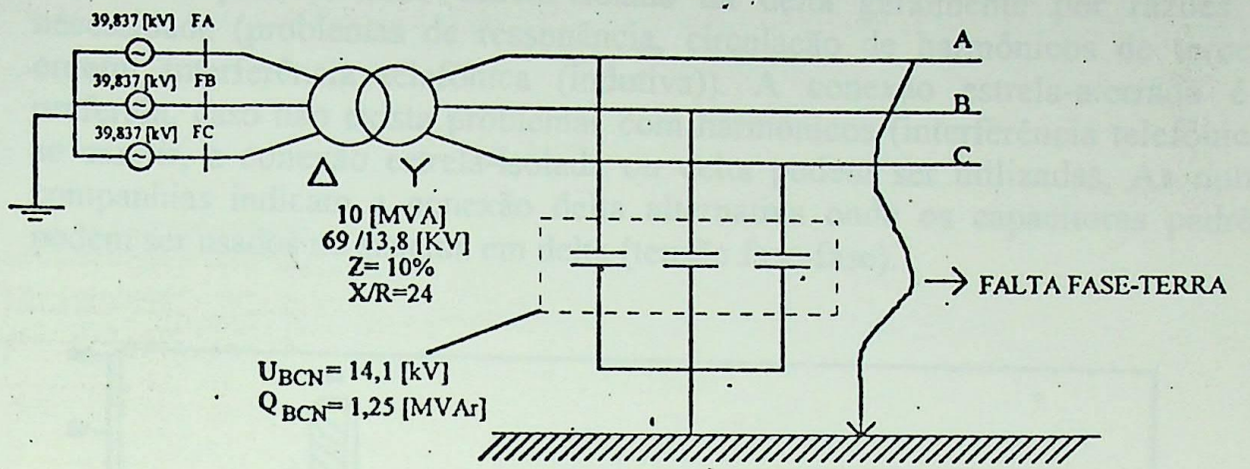


FIGURA 18- SISTEMA COM NEUTRO-ISOLADO E BANCO DE CAPACITORES ATERRADO, OCORRENDO UMA FALTA FASE-TERRA

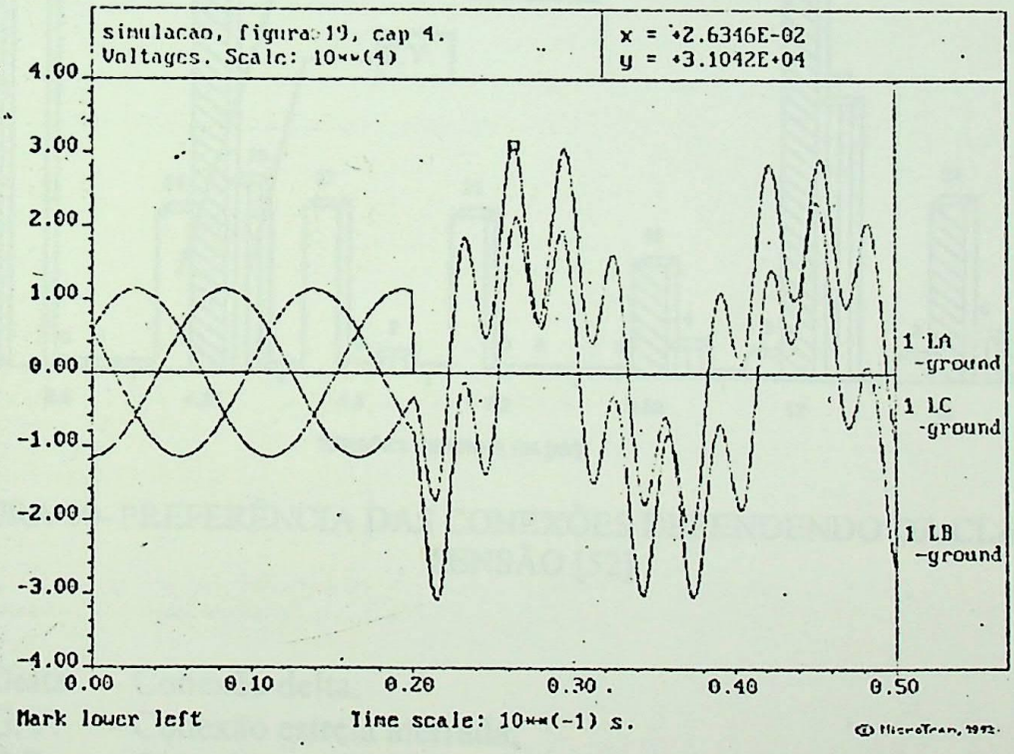


FIGURA 19- SIMULAÇÃO DA FIGURA 18

3- VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS CONEXÕES

Serão mostrada as principais vantagens e desvantagens das conexões. As conexões podem ser diferentes dependendo das características do sistema. O gráfico da figura 20, mostra o grau de utilização das conexões nos Estados Unidos para várias classes de tensão em uma pesquisa realizada em 1959 [52]. A pesquisa revela que das 63 companhias que responderam a pesquisa, consideram

a conexão estrela-aterrada como preferida, em segundo lugar esta a conexão estrela-isolada e em terceiro a conexão delta. -

A pesquisa revela que das 63 companhias que responderam a pesquisa, 55 preferem a conexão estrela-aterrada. Cinco das companhias tem preferência secundária pela conexão estrela-isolada ou delta geralmente por razões de necessidade (problemas de ressonância, circulação de harmônicos de terceira ordem, interferência telefônica (indutiva)). A conexão estrela-aterrada é a preferida, caso não exista problemas com harmônicos (interferência telefônica), se exixtir, a conexão estrela-isolada ou delta podem ser utilizadas. As outras companhias indicam a conexão delta alternativa onde os capacitores padrões podem ser usados no sistema em delta (tensão fase-fase).

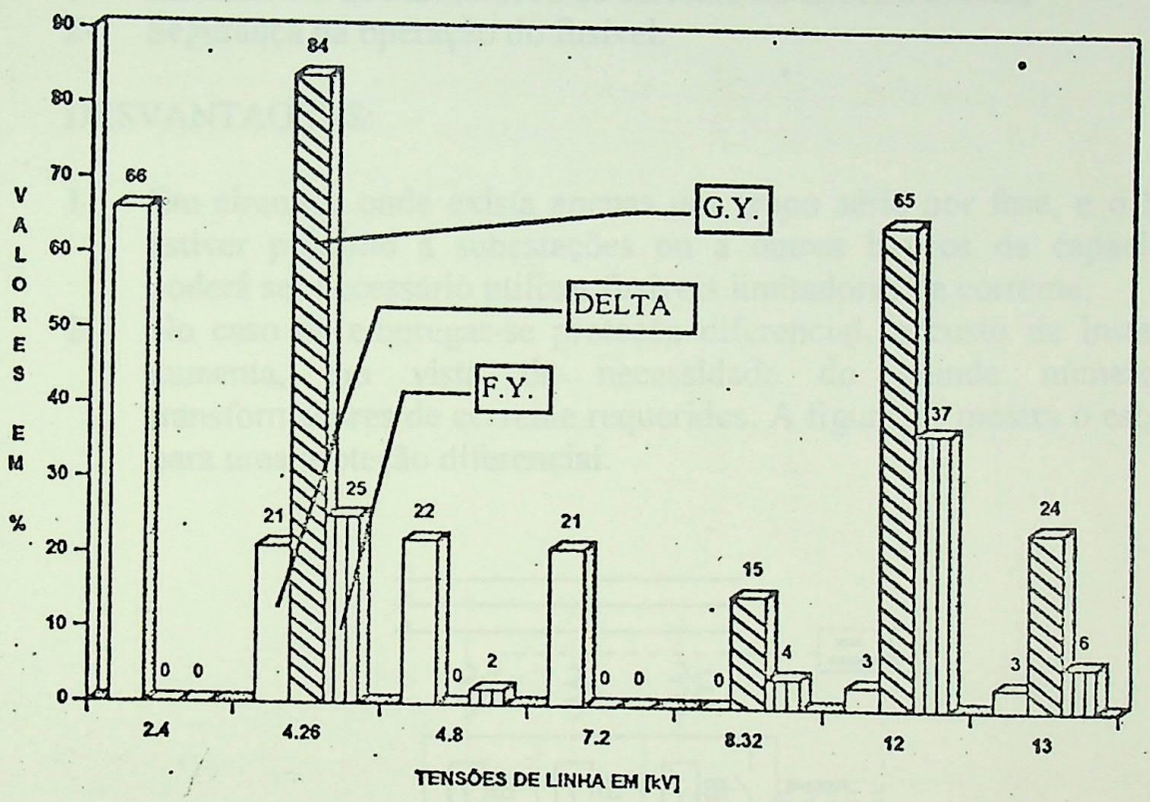


FIGURA 20- PREFERÊNCIA DAS CONEXÕES DEPENDENDO DA CLASSE DE TENSÃO [52]

onde:

Delta - Conexão delta;
G.Y. - Conexão estrela aterrada;
G.F. - Conexão estrela isolada.

Há várias razões dadas pelas companhias para a preferência de bancos em estrela-aterrada sobre os bancos em estrela-isolada ou delta, mas as principais são:

* Operação mais segura do fusível;
* Não há problema de "ressonância" em sistemas aterrados, se algum (ou alguns) condutor da fonte abrir;

* Há algum grau de proteção para o sistema contra problemas de chaveamento e surtos atmosféricos;
* O vantagem que mais células capacitivas podem ser danificadas sem que ocorra o limite de sobretensão nas unidades restantes do mesmo grupo, o que provocaria a perda de unidades boas do grupo. Este limite de sobretensão é aconselhável da ordem de 10% [46].

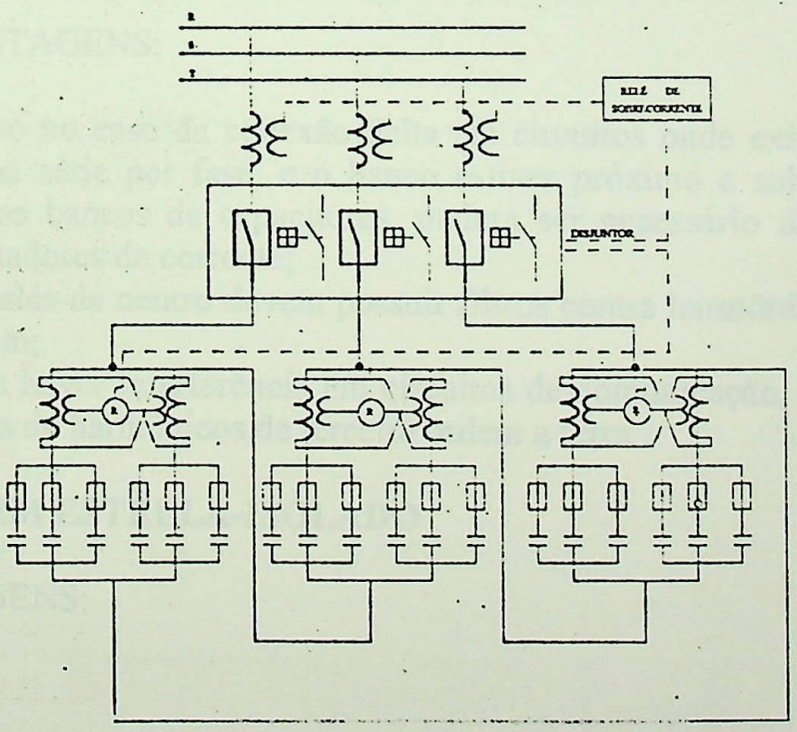
3.1- CONEXÃO TRIÂNGULO (DELTA)

VANTAGENS:

1- Inexistência de harmônicos de corrente de terceira ordem;
2- Segurança na operação do fusível.

DESVANTAGENS:

1- Em circuitos onde exista apenas um grupo série por fase, e o banco estiver próximo a subestações ou a outros bancos de capacitores, poderá ser necessário utilizar fusíveis limitadores de corrente;
2- No caso de empregar-se proteção diferencial, o custo da instalação aumenta, em vista da necessidade do grande número de transformadores de corrente requeridos. A figura 21 mostra o esquema para uma proteção diferencial.



Biblioteca MAUÁ BIM de Itajubá - EFEI

FIGURA 21- ESQUEMA DE PROTEÇÃO DIFERENCIAL PARA A CONEXÃO DELTA

3.2- ESTRELA COM NEUTRO-ATERRADO

VANTAGENS:

1- Um número maior de capacitores pode falhar, antes de ser atingido o limite de 10% de sobretensão nas unidades restantes;
2- Capacitores ligados em estrela-aterrada fornecem uma via de escoamento de baixa impedância para as correntes de descargas atmosféricas;
3- Como neste caso o neutro é fixo, a tensão de restabelecimento transitória (TRT) é reduzida, e o banco de capacitores pode ser manobrado como se fossem três bancos monofásico independentes. Estas condições de restabelecimento da tensão existem sempre, durante as manobras de bancos de capacitores; no caso de acionamento de fusíveis, essa TRT é a tensão que existe no cartucho no instante em que o circuito é interrompido. Dependendo dos parâmetros do sistema e do tamanho do banco, a tensão de restabelecimento pode ser de 2,0 a 2,5 vezes a tensão de pico normal do sistema quando o banco é aterrado, enquanto que para bancos não aterrados, esse valor pode chegar a 3 vezes ou mais [53];
4- Nos casos em que se torna necessário obter uma via de escoamento de baixa impedância para o controle do nível dos harmônicos de tensão do sistema.

DESVANTAGENS:

1- Como no caso da conexão delta em circuitos onde exista apenas um grupo série por fase, e o banco estiver próximo a subestações ou a outros bancos de capacitores, poderá ser necessário utilizar fusíveis limitadores de corrente;
2- Os relés de neutro devem possuir filtros contra harmônicos de terceira ordem;
3- Pode haver interferência em circuitos de comunicação, em virtude do fluxo de harmônicos de terceira ordem a terra.

3.3- BANCO EM ESTRELA-ISOLADO

VANTAGENS:

1- A conexão estrela aterrada evita o fluxo de corrente de desequilíbrio, que em sistemas com neutro aterrado, poderia sensibilizar o relé de proteção de terra;
2- O banco é insensível aos harmônicos de corrente de sequência zero de terceira ordem.

DESVANTAGENS:

1- O neutro deve ser isolado para a tensão fase-fase, por prevenção contra surtos de manobra; no que diz respeito a custo, isto é pouco importante em tensões baixas, mas pode se tornar dispendioso em tensões mais elevadas;
2- A corrente de curto-circuito é menor que a recomendada, já que para uma atuação correta do fusível necessita-se de uma corrente de 10 vezes a corrente nominal, para os bancos estrela isolada a corrente máxima de defeito é da ordem de 3 vezes a corrente nominal;
3- No caso de haver um curto-circuito em uma das fases onde o banco está instalado, ocorrerá sobretensão nas fases boas, podendo vir a danificar equipamentos ligados no mesmo barramento que o banco.

3.4- BANCO EM DUPLA-ESTRELA-ISOLADA

VANTAGENS:

1- Os distúrbios do sistema não se transmitem ao circuito de proteção do banco;
2- O banco é de baixo custo, principalmente no que diz respeito a proteção;
3- Não há via de escoamento de harmônicos de corrente de sequência zero de terceira ordem;

DESVANTAGENS:

1- O número mínimo de unidades paralelas por grupo exige normalmente a formação de bancos com mais unidades que as exigidas por outras conexões;
2- Há necessidades de uma área maior, para a mesma capacidade, quando comparado com a estrela simples, assim como maior quantidade de barramentos e conexões;
3- O neutro deve ser isolado para o mesmo valor do nível de impulso do sistema, tal como qualquer banco ligado em estrela com neutro isolado.

3.5- CONEXÃO DUPLA-ESTRELA-ATERRADA

VANTAGENS:

1- A proteção é simples e de baixo custo, principalmente no que diz respeito ao número de relés. A figura 22 mostra o esquema de proteção;
2- Capacitores ligados em estrela-aterrada fornecem uma via de escoamento de baixa impedância para as correntes de descargas atmosféricas;

3- Nos casos em que se torna necessário obter uma via de escoamento de baixa impedância para o controle do nível dos harmônico de tensão do sistema, um banco aterrado fornece este caminho.

DESVANTAGENS:

1- Os relés devem ser filtrados contra harmônicos de terceira ordem;
2- Pode haver interferência em circuitos de comunicação, em virtude do fluxo de harmônicos de terceira ordem para a terra.

OBSERVAÇÃO: A utilização da conexão em dupla-estrela (aterrada ou não) com relação a estrela-simples está envolvida com o número de capacitores em paralelo por grupo. Se um banco de capacitores estrela-simples necessitar de mais que 3100 [kVAr] por grupo, deverão ser utilizados capacitorês com menor tensão nominal formando mais grupos série por fase com menos unidades capacitivas em paralelo por grupo, esta situação pode levar a uma redução inaceitável de corrente no neutro do banco de capacitores, para uma atuação correta do sistema de proteção por relé de desequilíbrio, o banco de capacitores então deverá ser rearranjado na configuração dupla-estrela, que permite uma maior sensibilidade de para a atuação do relé de desequilíbrio [74] (vide figura 14, capítulo 5). Conforme [46], bancos em dupla-estrela poderão ser utilizados a partir de 1,5 [MVAr].

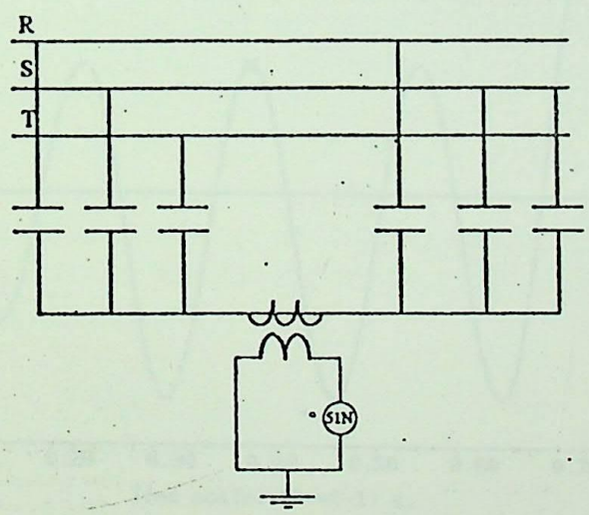


FIGURA 22- ESQUEMA DE PROTEÇÃO DE NEUTRO DA CONEXÃO DUPLA-ESTRELA ATERRADA

4- SOBRETENSÕES DEVIDO A PERDAS DE UNIDADES CAPACITIVAS (REFERÊNCIA BÁSICA [3])

Deve-se determinar o número de unidades capacitivas em paralelo, que deve não permitir uma sobretensão superior a 10% as unidades capacitivas restantes, quando são eliminados uma ou mais unidades capacitivas de um banco de capacitores. O esquema da figura 23 mostra o problema da sobretensão nas

unidades restantes após a perda de unidades capacitivas e a figura 24 (ver anexo 10) mostra uma simulação do caso.

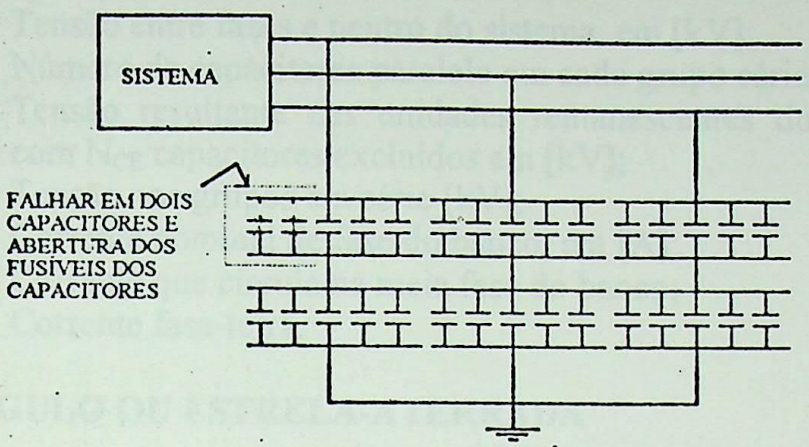


FIGURA 23 - ESQUEMA UTILIZADO PARA DEMONSTRAR O PROBLEMA DE SOBRETENSÃO DEVIDO A PERDA DE UNIDADES EM UM BANCO DE CAPACITORES

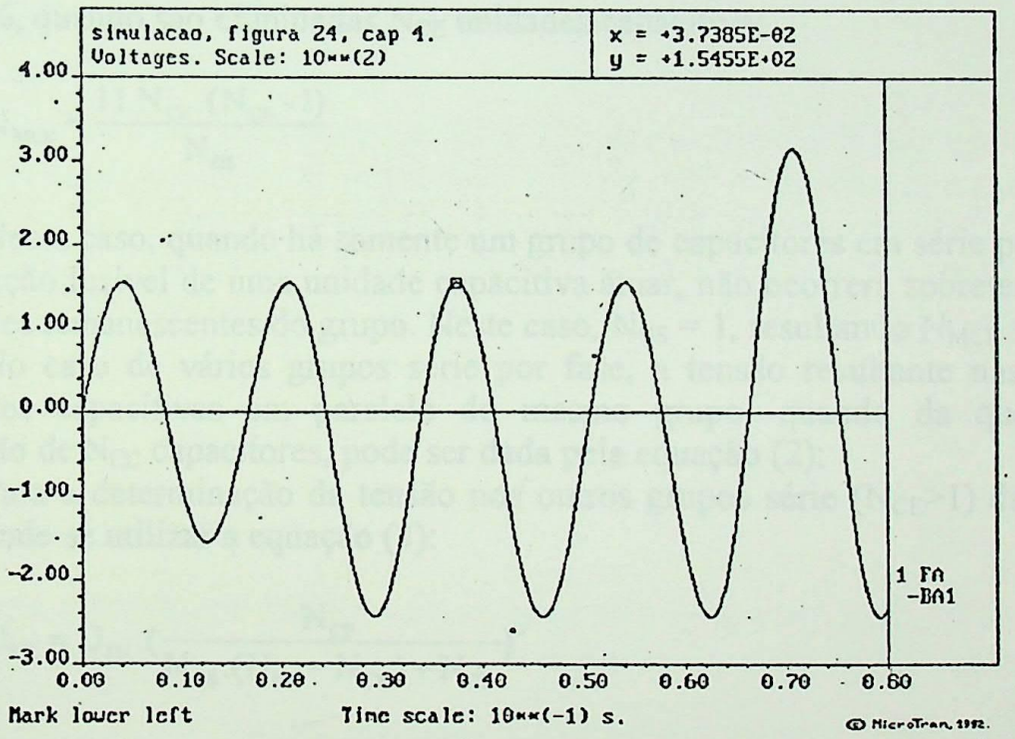


FIGURA 24- SIMULAÇÃO MOSTRANDO O PROBLEMA DE SOBRETENSÃO PARA O ESQUEMA DA FIGURA 23

Nomenclatura das equações do limite de sobretensão:

N_{MCP}- Número mínimo de capacitores em paralelo em cada grupo série por fase;

N_{GS} - Número de grupos série por fase;

N_{CE} - Número de unidades capacitivas eliminadas de um único grupo série;

U_C - Tensão em cada grupo, quando todas as unidades estão em operação;
U_{FN} - Tensão entre fases e neutro do sistema, em [kV];
N_{CP} - Número de capacitores paralelo em cada grupo série;
U_{UR} - Tensão resultante nas unidades remanescentes do mesmo grupo com N_{CE} capacitores excluídos em [kV];
U_{GR} - Tensão nos grupos em série [kV];
I_N - Corrente nominal de fase do banco, em [A];
I_{MF} - Corrente que circula na meia fase do banco;
I_T - Corrente fase-terra.

4.1- TRIÂNGULO OU ESTRELA-ATERRADA

As figuras 14 e 15 do capítulo 5 ilustram os esquemas das conexão triângulo com proteção por sobrecorrente de fase e estrela-aterrada com proteção por sobrecorrente de fase e desequilíbrio. O número de unidades capacitivas em paralelo que deve possuir um banco de capacitores para evitar uma sobretensão de 10%, quando são eliminadas N_{CE} unidades capacitiva:

$$N_{MCP} \geq \frac{11.N_{CE}.(N_{CE}-1)}{N_{GS}} \qquad (1)$$

Nesse caso, quando há somente um grupo de capacitores em série por fase e a proteção fusível de uma unidade capacitiva atuar, não ocorrerá sobretensão nas unidades remanescentes do grupo. Neste caso, $N_{GS} = 1$, resultando $N_{MCP} = 0$.

No caso de vários grupos série por fase, a tensão resultante nas demais unidades capacitivas em paralelo do mesmo grupo, quando da queima da proteção de N_{CC} capacitores, pode ser dada pela equação (2):

Para a determinação da tensão nos outros grupos série ($N_{CE}>1$) da mesma fase, pode-se utilizar a equação (3):

$$U_{UR} = U_{FN}.\left(\frac{N_{CP}}{N_{GS}.(N_{CP}-N_{CE})+N_{CE}}\right) \qquad (2)$$

Deve-se ter: $U_{UR} \geq U_C$

$$U_{GR} = U_{FN}.\left(\frac{N_{CP}-N_{CE}}{N_{GS}.(N_{CP}-N_{CE})+N_{CE}}\right) \qquad (3)$$

Deve-se ter: $U_{GR} < U_C$

Se o banco está na conexão triângulo, a tensão tomada será entre fases, U_{FF} em vez de U_{FN}.

A determinação da corrente que circula na fase afetada pela saída dos N_{CE} capacitores pode ser dada pela equação (4):

$$I_F = I_N \cdot \left(\frac{N_{GS}(N_{CP} - N_{CE})}{N_{GS} \cdot (N_{CP} - N_{CE}) + N_{CE}}\right) \quad (4)$$

A corrente que circula para a terra através do neutro do sistema quando são excluído N_{CE} capacitores de um grupo vale:

$$I_T = I_N \cdot \left(\frac{N_{CE}}{N_{GS} \cdot (N_{CP} - N_{CE}) + N_{CE}}\right) \quad (5)$$

4.2- CONEXÃO EM ESTRELA-ISOLADA

É ilustrado na figura 16 do capítulo 5 o esquema da conexão estrela-isolada com proteção por sobrecorrente de fase e desequilíbrio. O número de unidades em paralelo, eliminadas em um mesmo grupo, de modo à não proporcionar uma sobretenção de 10 % nas unidades restantes, vale:

$$N_{MCP} = \frac{11.N_{CE}.(3.N_{GS} - 2)}{3.N_{GS}} \quad (6)$$

Para uma conexão onde há um ou mais grupos série por fase, contendo cada um deles uma determinada quantidade de capacitores ligados em paralelo, a queima de um elo fusível ou mais em uma ou mais unidades capacitivas acarreta um desequilíbrio no sistema, cuja tensão nas unidades capacitivas remanescentes do grupo considerado pode ser bastante elevada, de acordo com a equação (7).

$$U_{UR} = U_{FN} \cdot \left(\frac{3.N_{CP}}{3.N_{GS} \cdot (N_{CP} - N_{CE}) + 2.N_{CE}}\right) \quad (7)$$

Deve-se ter: $U_{UR} > U_C$

U_C é a tensão em cada grupo, quando este é operado com todas as suas unidades capacitivas. A tensão nos grupos restantes ($N_{GS} > 1$) da mesma fase vale:

$$U_{UR} = U_{FN} \cdot \left(\frac{3.(N_{CP} - N_{CE})}{3.N_{GS} \cdot (N_{CP} - N_{CE}) + 2.N_{CE}}\right) \quad (8)$$

Deve-se ter :$U_{GR} < U_C$

Neste caso, a tensão é sempre inferior à tensão de neutro do grupo. A corrente que circula na fase afetada é dada pela equação (9):

$$I_D = I_N \cdot \left(\frac{3.N_{GS}(N_{CP} - N_{CE})}{3.N_{GS} \cdot (N_{CP} - N_{CE}) + 2.N_{CE}}\right) \quad (9)$$

A tensão entre fase neutro e a terra, com a queima de N_{CE} capacitores de um determinado grupo, vale:

$$U_{NT} = U_{FN}.\left(\frac{N_{CE}}{3.N_{GS}.(N_{CP}-N_{CE})+2.N_{CE}}\right) \quad (10)$$

4.3- CONEXÃO EM DUPLA-ESTRELA-ISOLADA

É ilustrado na figura 17 do capítulo 5 o esquema da conexão dupla-estrela-isolada com proteção por sobrecorrente e desequilíbrio. O número mínimo de unidades em paralelo em um mesmo grupo, de modo que se evite uma sobretensão maior que 10% quando na saída de operação de N_{CE} unidades capacitivas:

$$N_{MCP} = \frac{11.N_{CE}.(6.N_{GS}-5)}{6.N_{GS}} \quad (11)$$

Assim, a tensão que resulta nas unidades subjacentes do mesmo grupo vale:

$$U_{UR} = U_{FN}.\left(\frac{6.N_{CP}}{6.N_{GS}.(N_{CP}-N_{CE})+5.N_{CE}}\right) \quad (12)$$

Deve-se ter: $U_{UR} < U_C$

Consequentemente, a tensão em cada um dos demais grupos ($N_{GS}>1$) da fase afetada:

$$U_{UR} = U_{FN}.\left(\frac{6.(N_{CP}-N_{CE})}{6.N_{GS}.(N_{CP}-N_{CE})+5.N_{CE}}\right) \quad (13)$$

Deve-se ter :$U_{GR} < U_C$

A corrente que circula entre os neutros após a eliminação de uma ou mais unidades capacitivas de um determinado grupo vale:

$$I_D = I_{MF}.\left(\frac{3.N_{CE}}{6.N_{GS}.(N_{CP}-N_{CE})+5.N_{CE}}\right) \quad (14)$$

sendo:

I_{MF} - Corrente que circula na meia fase do banco.

Se o neutro do banco de capacitores está a terra através de uma impedância elevada, a tensão que ocorre entre o neutro e a terra, após a eliminação de uma ou mais unidades capacitivas, vale:

$$U_{ND} = U_{FN} \cdot \left(\frac{N_{CE}}{6.N_{GS}.(N_{CP} - N_{CE}) + 5.N_{CE}} \right) \quad (15)$$

4.4- CONEXÃO EM DUPLA-ESTRELA-ATERRADA

A figura 18 do capítulo 5 mostra o esquema de proteção da conexão dupla-estrela-isolada.

Os cálculos realizados para a conexão estrela-aterrada podem ser utilizados na conexão dupla-estrela-aterrada aplicando-se as mesmas equações do item 4.1., devendo levar em consideração, cada seção (constitue *metade* do banco de capacitores) da dupla-estrela-aterrada como uma estrela-simples-aterrada.

5- CONEXÕES EM BAIXA TENSÃO (≤1000 [V])

Considera-se baixa tensão, as tensões inferiores e até 1000 [V].

Os bancos de capacitores de baixa tensão são normalmente empregados em conexão triângulo e são configurados com capacitores com classe de tensão fase-fase [82].

6- CONEXÃO EM ALTA TENSÃO (>1000[V])

Como regra básica e caso não haja problemas no sistema que proíba o uso de uma conexão ou outra (harmônicos, interferência em sistemas telefônicos, operação de fusíveis etc.), a escolha do tipo de conexão a ser usada em bancos de capacitores com tensões acima de 1000 [V], depende da configuração do sistema, aterrado ou não. A regra básica é aquela mostrada no item 2.6, em outras palavras:

> *O banco de capacitores só deverá ser aterrado quando instalado em sistemas efetivamente aterrados* [82].

Vale salientar que os sistemas em média tensão são geralmente sistemas isolados, com isso deve-se projetar banco de capacitores com neutro-isolado (delta, estrela-isolada). Os bancos de capacitores com estrela-isolada, requerem um sistema de proteção mais simples, tornando-se assim, uma vantagem econômica sobre a conexão delta. Não se deve aterrar o banco de capacitores em sistemas isolados, pois estes podem atuar falsamente o rele de neutro.

Em alta tensão, bancos de capacitores acima de 69 [kV], utilizam a conexão estrela-aterrada, devido à tensão de restabelecimento e a reignição de arco. A tensão de restabelecimento é um fator importante para a determinação da capacidade de chaveamento da chave e a conexão estrela-aterrada possui uma

capacidade de restabelecimento de menor amplitude que em bancos de capacitores com neutro-isolado (item 3.2), e como a partir de 100 [kV], as diferenças nos custos das chaves de manobra são marcantes e como os bancos de capacitores em estrela-isolada necessitam utilizar chaves com mais aberturas por pólo, a conexão estrela-aterrada é a mais utilizada [74].

CAPÍTULO V

PROTEÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

Escola Federal de Eng
Itajubá

PROTEÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

1- INTRODUÇÃO

Os bancos de capacitores podem ser submetidos a defeitos de origem externa (sistema) ou interna (unidades capacitivas que compõem o banco de capacitores). Assim prevê-se a necessidade de se instalar sistemas de proteções a fim de se evitar danos às demais unidades capacitivas ou mesmo limitar os seus efeitos.

Uma proteção envolve fusíveis e relés, os quais são empregados em função da potência do banco de capacitores, sua localização no sistema, tipo de conexão e etc. As unidades capacitivas podem ser protegidas através de fusíveis, em cada unidade individual ou em grupo. Relés podem ser aplicados para a proteção do banco de capacitores de um modo geral.

Uma boa proteção da unidade capacitiva deve ser segura, rápida, e sempre tentar ao máximo isolar a unidade capacitiva (capacitor) defeituosa, assegurando a continuidade de serviço, que é muito importante para o sistema produtivo.

Uma proteção incorreta pode provocar vários danos. Quando um capacitor com proteção por fusível externo entra em curto-circuito, permanecendo além de tempos pré-determinados, poderão ocasionar ruptura da caixa do capacitor devido o aumento da pressão do gás oriundo da decomposição dos materiais dielétricos pela ação do arco na região de defeito. Quanto mais tempo durar a passagem dessa corrente de defeito, ou também quanto maior a intensidade dessa corrente, maior a probabilidade de uma ruptura da caixa. Os danos que, então, um capacitor mal protegido podem ocasionar vão desde um simples vazamento de líquido até a explosão da caixa, cujos fragmentos podem danificar equipamentos e até, o mais grave, acidentar pessoas.

Os tipos usuais de proteção de banco da capacitores são:

a - Fusível externo individual para cada capacitor;
b - Fusíveis internos nos elementos capacitivos (bobina) que constituem o capacitor;
c - Fusíveis externos para grupos de capacitores;
d - Relés de sobrecorrente para o desligamento geral do banco de capacitores;
e - Transformador de potencial ligado em cada fase ou em cada grupo série por fase, nos bancos de capacitores ligados em estrela com neutro isolado, para identificar um desequilíbrio na fase ou no grupo;
f - Transformadores de corrente ou de potencial ligados entre os neutros de dois ou mais bancos de capacitores ligados em estrela com neutro isolado, os quais operarão com o desequilíbrio do banco;
g - Transformador de potencial ligado entre o neutro e a terra, em um banco ligado em estrela com neutro isolado, para detectar o deslocamento do neutro.

2- FUSÍVEL

2.1- CONSIDERAÇÕES

Os fusíveis providenciam uma proteção adequada das unidades capacitivas e têm sido o principal meio usado nos esquemas de proteção.

A principal filosofia do uso dos fusíveis nos bancos de capacitores é que as unidades capacitivas quando da ocorrência de um defeito interno, seja retirada de operação o mais rápido possível para que não provoque danos maiores.

É recomendado que para uma atuação correta do fusível, o mesmo seja atravessado por uma corrente de defeito que não seja inferior a dez vezes a corrente nominal da unidade capacitiva [46]. Esta recomendação torna-se um problema no caso da conexão estrela-isolada, na qual a corrente máxima é limitada pela fases boas.

Os fusíveis nos bancos de capacitores podem ser fusíveis internos ou externos. Os fusíveis externos podem ser de expulsão ou limitadores de corrente podendo fornecer uma proteção individual ou de grupo.

As principais funções dos fusíveis individuais são:

I - Isolar do circuito o capacitor defeituoso, antes que possa ocorrer danos maiores (danificar outros capacitores, ferir pessoas, etc.). O fusível deve limitar e interromper a corrente, de modo a impedir a decomposição do meio impregnante e o aparecimento de pressão anormal dentro do capacitor, pela formação de arco;

II - Permitir a continuidade de serviço do banco de capacitores em caso de falha de uma unidade, evitando-se assim a interrupção total do banco até que o defeito seja corrigido;

III - Identificar facilmente o capacitor defeituoso em um banco constituído por muitas unidades (identificação visual);

IV - Indicar a presença de correntes anormais que poderão estar sendo causadas por condições de sobretensão ou por harmônicos, as quais poderiam causar superaquecimento e consequentemente a diminuição da vida útil do capacitor.

Os seguintes itens devem ser considerados ao selecionar uma proteção de sobrecorrente das unidades capacitivas, tanto para os fusíveis de grupo ou individual, [54].

a - Corrente em regime permanente no fusível:
b - Transitório de corrente (inrush);
c - A corrente disponível de falta no banco;
d - Coordenação com a curva de ruptura do tanque;
e - Tensão nas unidades restantes após a perda de unidades capacitivas;
f - Descarga de energia das unidades capacitivas em paralelo.

a- *Corrente em regime permanente no fusível*

O fusível selecionado deve ser capaz de suportar continuamente um limite de corrente (sobrecarga). Este valor de corrente de sobrecarga ou de segurança é devido a possíveis condições de sobretensão, tolerância capacitiva e harmônicos.

b- *Transitório de corrente*

Os fusíveis podem ser danificados devido a altos valores de corrente e frequência (transitórios de corrente). Os fusíveis quando especificados não podem atuar nestes casos, pois o mesmo estaria provocando uma falsa operação de defeito, logo estes devem ser dimensionados para suportar tal evento. As principais fontes de transitórios de corrente em sistemas industrias são: os chaveamentos de bancos de capacitores e descargas atmosféricas.

c- *Correntes de falta*

A corrente de falta nos bancos de capacitores é um importante fator para a seleção do tipo de fusível. A corrente, pode sofrer variações conforme a conexão no banco de capacitores ou o número de capacitores em paralelo.

A corrente de defeito (curto-circuito) em um capacitor com proteção externa, pode ser encontrada utilizando-se as equações (1), (2), (3) e (4) [46].

Para a conexão estrela -isolada,

$$I_F = \frac{3.N_{CP}.N_{GS}}{3.N_{GS} - 2} \qquad (1)$$

Para a conexão estrela-aterrada ou delta,

$$I_F = \frac{N_{CP}.N_{GS}}{N_{GS} - 1} \qquad (2)$$

Para conexão dupla-estrela-isolada

$$I_F = \frac{6.N_{CP}.N_{GS}}{6.N_{GS} - 5} \qquad (3)$$

onde:

N_{GS} - Número de grupos em série por fase;
N_{CP} - Número normal de capacitores em paralelo por grupo;
I_F - Fator de multiplicação da corrente nominal do capacitor.

Logo, a corrente que circula no capacitor no momento do defeito é dada por:

$$I_{FC} = I_N.I_F \qquad (4)$$

onde:

I_{FC} - Corrente de falta no capacitor;
I_N - Corrente nominal do capacitor.

A corrente de defeito desejável para uma correta operação do fusível é de dez vezes a corrente nominal [46], esta corrente pode ser facilmente encontrada em bancos de capacitores em estrela-aterrada ou delta, mas no caso da conexão estrela-isolada a corrente máxima é limitada pela impedância das fases boas e se existir apenas um capacitor por fase a máxima corrente alcançada no momento do defeito é de 3 vezes a corrente nominal do capacitor.

Com relação a conexão estrela-aterrada ou delta, deve-se verificar quando existir apenas um grupo de capacitores por fase, se o fusível possui suficiente capacidade de ruptura e se a corrente de curto não excede 4000 [A] para unidades de 25 ou 50 [kVAr] e 5000[A] para unidades de 100 [kVAr] e 6000 [A] para unidades acima de 100 [kVAr]. Esta preocupação com apenas um grupo de capacitores por fase é, que nessas conexões, no momento do curto-circuito no capacitor defeituoso, apenas a impedância dos cabos que liga o sistema ao capacitor limita a corrente de curto-circuito. Vale lembrar que bancos de capacitores próximos a subestações ou a outros bancos de capacitores terá uma corrente de curto-circuito mais elevada. Dependendo do caso é necessário a utilização de fusíveis limitadores de corrente.

Para aumentar a corrente de falta em uma unidade capacitiva defeituosa, e obter-se uma operação mais segura dos fusíveis na conexão estrela-isolada, por exemplo, deve-se utilizar capacitores em paralelo em um mesmo grupo, pois os capacitores em paralelo contribuem para a operação do fusível do capacitor defeituoso, devido os mesmos descarregarem a sua energia armazenada na unidade defeituosa (ver figura 1). O exemplo 1 demonstra este conceito, levando-se em consideração uma corrente mínima para uma atuação segura do fusível de 10 vezes a corrente nominal o qual foi projetado. Deve-se chamar atenção, que aumentando o número de capacitores em paralelo, para se obter uma maior corrente de defeito, o custo do banco de capacitores aumentará, além de necessitar de um maior espaço físico, muitas vezes não disponível, com isso, a troca de conexão pode vir a ser mais simples.

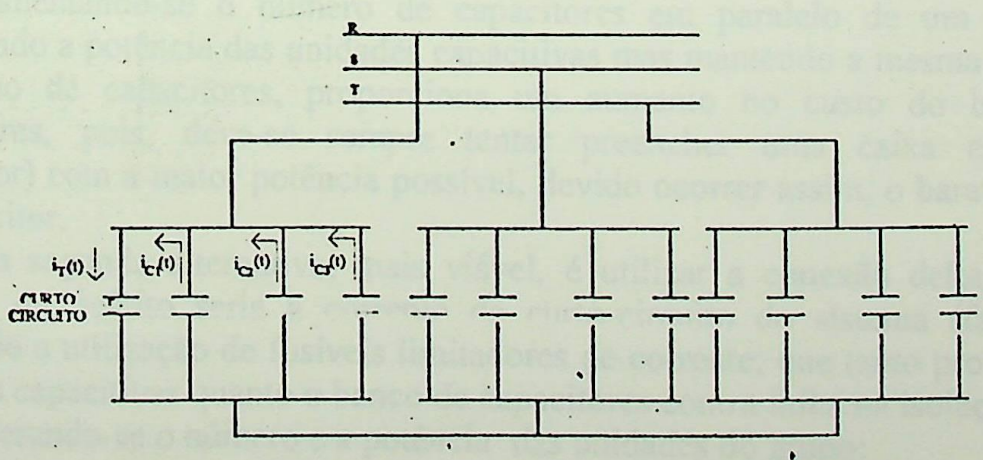


FIGURA 1- COMPORTAMENTO DAS CORRENTES NA OCORRÊNCIA DE UM CURTO-CIRCUITO EM UM UNIDADE CAPACITIVA

Exemplo 1:

Caso um banco de capacitores opera-se com conexão estrela-isolada com os seguintes dados:

U_{BNC} = 13,8 (fase-fase);
Q_{BCN} = 1,2 [MVAr];
Número de grupo série por fase = 1;
Número normal de capacitores em paralelo por grupo = 2;
Potência de cada unidade capacitiva = 200 [kVAr].

De posse da equação 1, tem-se:

$$I_F = \frac{3.2.1}{3.1-2} = 6$$

A corrente nominal em cada capacitor é:

$$I_C = \frac{200}{7,960} = 25 \text{ [A]}$$

Logo a corrente de defeito na unidade capacitiva defeituosa é:

$$I_{FC} = 6.25 = 150 \text{ [A]}$$

Como a corrente de defeito deve ser no mínimo de dez vezes a corrente nominal (10.25 [A] = 250 [A]), no exemplo citado não poderia ser utilizada a conexão estrela-isolada, pois a corrente de defeito alcançou apenas 150 [A]. Neste caso, tem-se duas alternativas: aumentar o número de unidades em paralelo no grupo ou alterar a conexão do banco.

Aumentando-se o número de capacitores em paralelo de um grupo e diminuindo a potência das unidades capacitivas mas mantendo a mesma potência do grupo de capacitores, proporciona um aumento no custo do banco de capacitores, pois, deve-se sempre tentar preencher uma caixa capacitiva (capacitor) com a maior potência possível, devido ocorrer assim, o barateamento do capacitor.

Um segunda alternativa, mais viável, é utilizar a conexão delta, pois, a corrente de defeito seria a corrente de curto-circuito do sistema (fase-fase), obrigando a utilização de fusíveis limitadores de corrente, que tanto protegem as unidades capacitivas quanto o banco de capacitores contra falha na isolação.

Alterando-se o número e a potência das unidades do grupo:

Número normal de capacitores em paralelo por grupo = 4;

Potência de cada unidade capacitiva = 100 [kVAr].
De posse da equação da equação 1, tem-se:

$$I_F = \frac{3.4.1}{3.1-2} = 12$$

A corrente nominal em cada capacitor é:

$$I_C = \frac{100}{7,960} = 12,5 \text{ [A]}$$

Logo a corrente de defeito da unidade capacitiva defeituosa é:

$$I_{FC} = 12.12,5 = 150 \text{ [A]}$$

Como a corrente de defeito deve ser no mínimo igual a 125 [A], e o valor obtido foi de 150 [A], a conexão estrela-isolada poderia neste caso ser utilizada. Observe que o exemplo comprova o número mínimo de capacitores em paralelo por grupo relacionados na tabela 1 para uma atuação correta do fusível individual.

O resultado da simulação da figura 4 mostra as correntes de defeito no capacitor defeituoso para o exemplo 1 (dois e quatro capacitores em paralelo por grupo), quando um capacitor em operação falha em um determinado instante. As figuras 2 e 3 mostram os diagramas utilizados nas simulação (ver anexo 16).

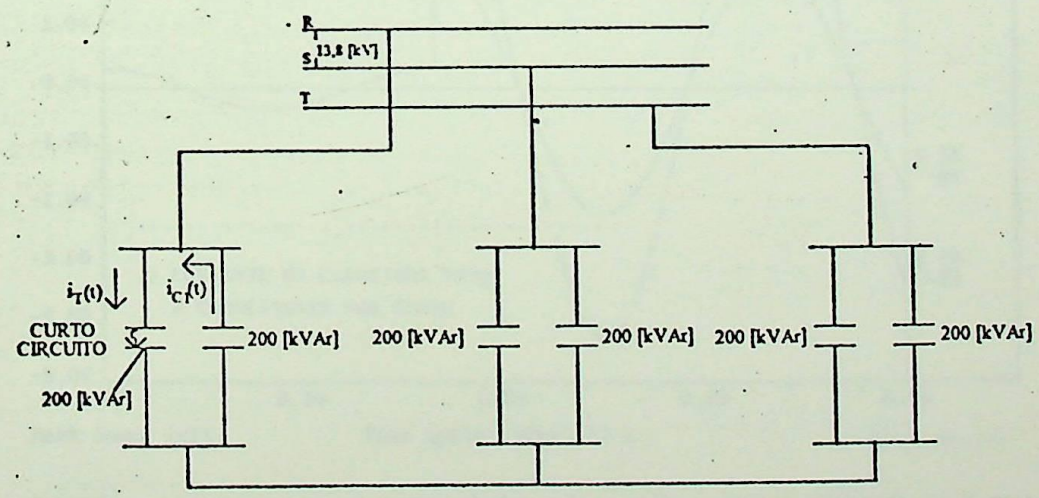


FIGURA 2- ESQUEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO PARA MOSTRAR O NÚMERO INCORRETO DE CAPACITORES EM PARALELO POR GRUPO PARA A CONEXÃO ESTRELA-ISOLADA

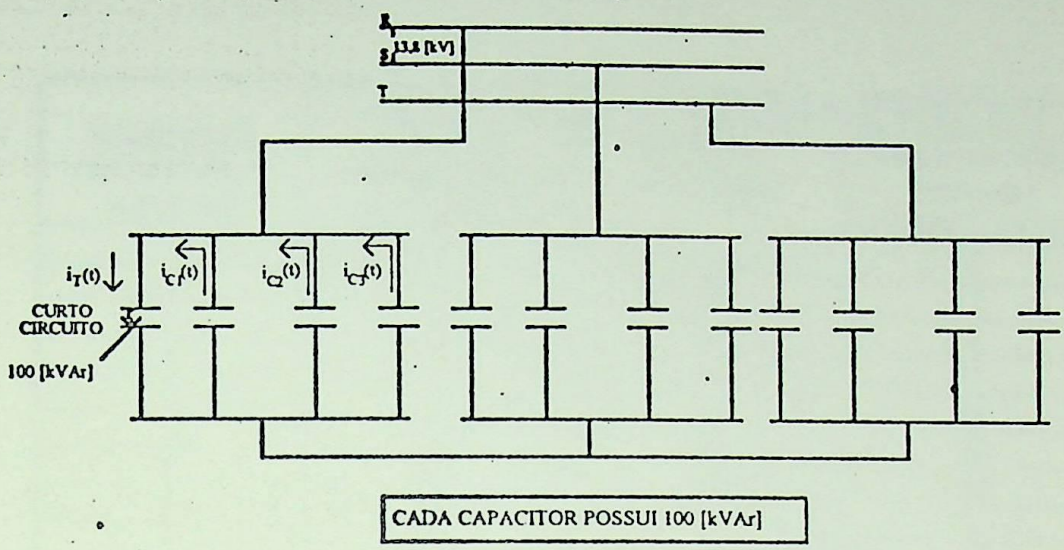


FIGURA 3- ESQUEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO MOSTRANDO O NÚMERO MÍNIMO DE CAPACITORES EM EM PARALELO POR GRUPO PARA UMA ATUAÇÃO CORRETA DO FUSÍVEL

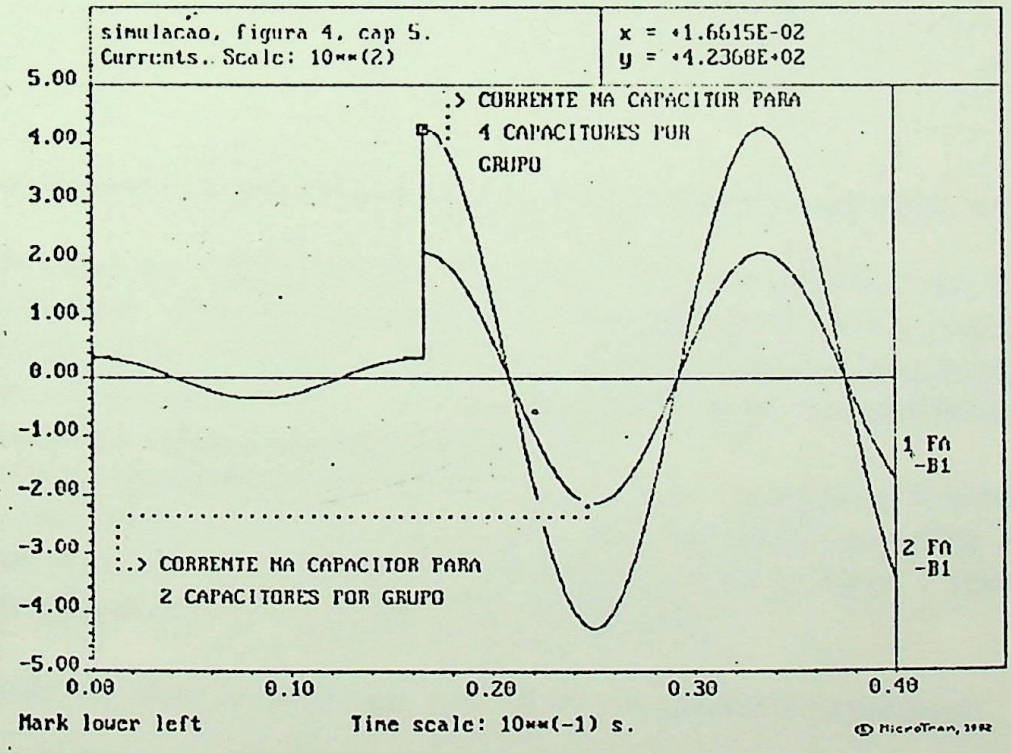


FIGURA 4- RESULTADO DAS SIMULAÇÕES DAS FIGURAS 2 E 3

Observe a tabela 1, que fornece o número de capacitores mínimos em paralelo por grupo de acordo com cada conexão para uma corrente de falta no capacitor defeituoso de no mínimo dez vezes a corrente nominal no capacitor,

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

sendo cada capacitor com seu fusível individual. A tabela 1 foi montada a partir da equações (1), (2) e (3).

NÚMERO DE GRUPOS SÉRIE POR FASE	NÚMERO MÍNIMO DE UNIDADES EM PARALELO		
	ESTRELA-ATERRADA OU TRIÂNGULO	ESTRELA-ISOLADA	DUPLA-ESTRELA-ISOLADA (SEÇÕES IGUAIS)
1	1	4	2
2	6	8	7
3	8	9	8
4	9	10	9
5	9	10	10
6	10	10	10
7	10	10	10
8	10	11	10
9	10	11	10
10	10	11	11
11	10	11	11
12	11	11	11

TABELA 1- NÚMERO MÍNIMO DE CAPACITORES EM PARALELO POR GRUPO DE ACORDO COM CADA CONEXÃO

d- *Coordenação da curva de operação fusível com a curva de ruptura da caixa*

A curva de tempo-corrente do fusível deve ser seletiva com a curva de tempo corrente da caixa do capacitor. A coordenação é necessária para evitar a ruptura da caixa da unidade capacitiva e dependendo do caso a explosão da mesma. Logo o fusível deve ser capaz de operar antes que problemas maiores com a unidade capacitiva venha a acontecer.

O tempo total de interrupção do fusível (para a corrente de defeito) deve ser menor que o tempo de ruptura da caixa do capacitor defeituoso. Esta verificação pode ser realizada utilizando-se as curvas apresentadas na figura 7 segundo [74], para os capacitores de 25, 50, 100, 150, 200 [kVAr].

e- *Tensão nas unidades restantes após falha em unidades capacitivas*

A falha em uma unidade capacitiva de um grupo de capacitores de um banco de capacitores provoca alteração nas tensões dos grupos da mesma fase ou alteração nas tensões das outras fases ou ambos.

Esta sobretensão que fica nos terminais dos capacitores após a falha de uma unidade capacitiva, deve ser levada em consideração no dimensionamento dos fusíveis. No caso de grandes bancos de capacitores, a queima de algumas unidades capacitivas, não leva a retirada do banco de capacitores de operação,

tem-se por objetivo assim, a continuidade de serviço, com isso as unidades restantes do banco de capacitores ficaram submetidas a um determinado nível de sobretensão, na prática normalmente, 110% da tensão nominal da unidade capacitiva. Logo, os fusíveis das unidades restantes devem ser dimensionados para suportar esta sobretensão temporária.

Utilizando-se as equações (5), (6), (7) e (8), para a determinação do número mínimo de capacitores em paralelo por grupo para limitar em 10% o aumento de tensão nas unidades restantes, quando um capacitor é excluído [74].

PARA BANCOS EM ESTRELA ATERRADA OU EM TRIÂNGULO

$$N_{MCP} = N_{CE} \cdot \frac{11.(N_{GS} - 1)}{N_{GS}} \qquad (5)$$

PARA BANCOS EM ESTRELA ISOLADA

$$N_{MCP} = N_{CE} \cdot \frac{11.(3.N_{GS} - 2)}{3.N_{GS}} \qquad (6)$$

PARA BANCOS EM DUPLA-ESTRELA-ISOLADA

$$N_{MCP} = N_{CE} \cdot \frac{11.(6.N_{GS} - 5)}{6.N_{GS}} \qquad (7)$$

PARA BANCOS EM DUPLA-ESTRELA-ATERRADA

$$N_{MCP} = N_{CE} \cdot \frac{22.N_{GS} - 33}{2.N_{GS}} \qquad (8)$$

onde:

N_{MCP} - Número mínimo de capacitores em paralelo em cada grupo série, necessário para limitar a sobretensão nas capacitores restantes em 10% da tensão nominal de operação do sistema (caso o número seja fracionado, arredondar para o número inteiro superior);

N_{GS} - Número de grupos em série por fase;

N_{CE} - Número de capacitores excluídos em um único grupo série.

Na tabela 2, tem-se o número mínimo de capacitores em paralelo por grupo para a conexão triângulo, estrela-aterrada, estrela-isolada e dupla-estrela-isolada, de forma a se obter uma sobretensão não maior que 10%, esse limite é

conseguido apenas com a retirada de um capacitor por grupo de uma mesma fase, conforme [22].

NÚMERO DE GRUPOS SÉRIE POR FASE	UNIDADES RETIRADAS DO GRUPO DE UMA FASE	TRIÂNGULO OU ESTRELA-ATERRADA	ESTRELA-ISOLADA	DUPLA-ESTRELA-ISOLADA
1	1	1	1	2
2	1	6	8	7
3	1	8	9	8
4	1	9	10	9
5	1	9	10	10
6	1	10	10	10
7	1	10	10	10
8	1	10	11	10
9	1	10	11	11
10	1	10	11	11
11	1	11	11	11
12	1	11	11	11

TABELA 2- NÚMERO MÍNIMO DE CAPACITORES EM PARALELO POR GRUPO PARA VÁRIAS CONEXÕES

f- *Descarga de energia das unidades capacitivas em paralelo*

O fusível e o capacitor defeituoso devem ser capazes de suportar a energia armazenada por outras unidades em paralelo do mesmo grupo, sabe-se que quando um capacitor do grupo falha, toda a energia armazenada nos capacitores em paralelo, será descarregada no capacitor defeituoso (ver figura 1). O cálculo da energia armazenada em paralelo não pode exceder a capacidade de energia do capacitor e fusível. Excedendo essas classes de energia, pode ocorrer a não operação correta do fusível e/ou a ruptura da caixa da unidade capacitiva.

Historicamente a energia máxima absorvida pelos capacitores quando submetidos a uma sobretensão de 110% da tensão nominal, é de 10000 [J] para capacitores de papel/filme e 15000 [J] para capacitores de filme. Contudo, recentemente avanços na tecnologia dos capacitores tem resultado em uma maior capacidade de energia. Como um exemplo, capacitores da Cooper Power Sistema Tipe Exline, podem ser aplicado em bancos com 30000 [J] com fusíveis de expulsão [58]. Utilizando-se a equação 9 e admitindo-se uma sobretensão de 1,1 [pu] a 60 [Hz], a potência de um grupo de capacitores em paralelo para 10000 [J], 15000 [J] e 30000 [J], é em torno de 3100 [kVAr], 4650 [kVAr] e 9300 [kVAr], respectivamente.

A energia armazenada em um grupo de capacitores em paralelo pode ser calculada pela equação 9.

$$E = \frac{Q.U^2}{2.\pi.f} \text{ [kJ]} \qquad (9)$$

onde:

E - Energia armazenada num capacitor ou grupo de capacitores, em [kJ];
Q - Potência do capacitor ou de um grupo de capacitores, em [kVAr];
U - Tensão do capacitor ou grupo de capacitores, em [pu];
f - Frequência do capacitor ou do grupo de capacitores, em [Hz].

Quando os valores calculados de energia excedem as limitações dos fusíveis de expulsão, existem duas soluções possíveis:

1 - Reprojetar o banco, reduzindo as unidades em paralelo ou aumentar o número de grupos de capacitores em série por fase.
2 - Utilizar fusíveis limitadores de corrente.

2.2- TIPOS DE FUSÍVEIS

Os tipos básicos de fusíveis externos para proteção dos capacitores são:

- Fusíveis externos (tipo expulsão);
- Fusíveis limitadores de corrente;
- Fusíveis internos (capacitores com fusíveis internos).

2.2.1- FUSÍVEIS PARA BAIXA TENSÃO (até 1000 [V])

Para unidades trifásicas ou monofásicas de baixa tensão, os fusíveis devem ter alta capacidade de ruptura, retardados, do tipo NH ou diazed [46].

Segundo [46], os fusíveis devem ser dimensionados para 1,65 vezes a corrente nominal da unidade capacitiva.

Caso necessário fusíveis limitadores de corrente podem serem utilizados em baixa tensão.

2.2.2- FUSÍVEIS PARA ALTA TENSÃO (superior a 1000 [V])

Em alta tensão, são utilizados normalmente fusíveis do tipo expulsão, ou fusíveis limitadores de corrente.

Segundo [74], o fusível deve suportar continuamente uma corrente de 1,25 vezes a corrente nominal do banco de capacitores com conexões triângulo ou neutro não aterrado e 1,35 para bancos de capacitores com neutro aterrado.

2.2.3- OS FUSÍVEIS DE EXPULSÃO

Consistem basicamente de um tubo especial de fibra de vidro e um elo fusível de distribuição (K ou T), alojado no seu interior. Este tubo proporciona um meio de extinção para o arco proveniente do elo fusível. As figuras 5 e 6 mostram as curvas características dos fusíveis do tipo K e T respectivamente.

Os fusíveis de expulsão expelem um vapor proveniente da fusão do elemento do elo fusível, provocando um ruído (estampido) característico, quando interrompem uma corrente de falta. É usual instalar um fusível de expulsão de

forma a proporcionar uma distância de seccionamento conveniente entre fusível e o capacitor por ele protegido.

Quando o fusível de expulsão é submetido a uma corrente superior a sua nominal, o elo fusível começa a se fundir. Quando a corrente passa por zero, e o elo estiver fundido, consequentemente rompido, o fluxo de corrente será interrompido, consequentemente o capacitor defeituoso será retirado de operação. Estes fusíveis não possuem ação limitadora de corrente e não podem "forçar um zero de corrente", como veremos adiante. Eles apenas introduzem uma resistência de arco, que faz a corrente decair a uma taxa mais rápida do que ocorreria sem a presença do fusível.

Uma proteção adequada que um elo fusível (K ou T) pode proporcionar é minimizar o $I^2.t$ (energia dissipada pelo o fusível no momento da fusão) que fluirá através de um capacitor defeituoso, três condições devem serem satisfeitas antes de se chegar a uma decisão [56]:

I - Tentar minimizar o $I^2.t$ gerado por uma condição de falta a 60 [Hz];
II - Eliminar operações indesejáveis associadas a corrente de "inrush" e, à descargas capacitivas devidas à faltas nos barramentos ou entre unidades defeituosas.
III - Utilizar o menor elo fusível capaz de manter as suas características nominais na dissipação de $I^2.t$ (gerado, quando da circulação de sobrecorrentes de regime permanente devidas à sobretensões ou sobrecapacitâncias).

Elos fusíveis do tipo K são de atuação mais rápida que os do tipo T, devido a isto, são historicamente mais utilizados na proteção de banco de capacitores. No entanto, os elos fusíveis do tipo T necessitam de uma energia maior para se fundirem, esta característica, pode ser utilizada onde as correntes transitórias de valor elevado e curta duração associados com manobras do banco de capacitores ou transitórios na tensão do sistema. Mas vale ressaltar que, a duração típica desses transitórios é geralmente menor que o tempo correspondente a um ciclo da frequência nominal do sistema, e durante tempos tão curto não há dissipação apreciável do calor produzido no elo fusível [74].

Para uma corrente nominal do fusível de 1,65 vezes a corrente nominal do capacitor, os aspectos II e III acima mencionados do item 2.2.3 serão satisfeitos, com isso, uma proteção individual dos capacitores com o elo fusível do tipo K, pode ser realizada [56].

Encontrado o fusível adequada a suportar a corrente nominal do capacitor, passa-se a determinação da corrente de defeito no capacitor defeituoso no momento da falta, para verificar se o fusível escolhido, opera mais rapidamente que a caixa da unidade capacitiva possa a vir sofrer danos maiores que o normal (esturfamento da caixa).

A corrente de defeito (I_{FC}) no capacitor defeituoso é determinada pela equação (4). Esta corrente de defeito, deve ser levada as curvas de probabilidade de ruptura da caixa do capacitor (ver figura 8) [74], com isso, verificar se o fusível escolhido está localizado na zona segura.

A figura 7, mostra a probabilidade de ruptura da caixa para unidades capacitivas de 25 e 50 [kVAr] para gráfico A, 100 [kVAr] para gráfico B e 150 e 200 [kVAr] para gráfico C, e se dividem em 4 zonas.

Zona segura - Segura na maioria das aplicações, usualmente não haverá maiores danos além de um ligeiro estufamento da caixa;

Zona 1 - Utilizável em lugares onde ruptura da caixa e/ou escorrimento do líquido isolante da unidade capacitiva não causará danos;

Zona 2 - Utilizável em lugares que tenham sido escolhidos após cuidadosas considerações quanto possíveis consequências da ruptura violenta da caixa;

Zona prejudicial - Perigoso na maioria das aplicações, a caixa facilmente pode ser rompida com suficiente violência para danificar unidades adjacentes ou até mesmo ferir pessoas com os estilhaços da caixa;

Deve-se tomar cuidado, onde exista apenas um grupo série por fase, no caso de conexao estrela-aterrada o fusivel deve ser capaz de suportar uma corrente de curto circuito fase-terra do sistema e na conexão delta uma corrente de fase-fase. Logo, deve-se esperar elevadas correntes de curto-circuito em bancos de capacitores próximos a substações ou/e a outros bancos de capacitores.

Caso a corrente de defeito na unidade capacitiva for superior 5 [kA], não se utilizar fusíveis de expulsão e sim fusíveis limitadores de corrente [74] [75].

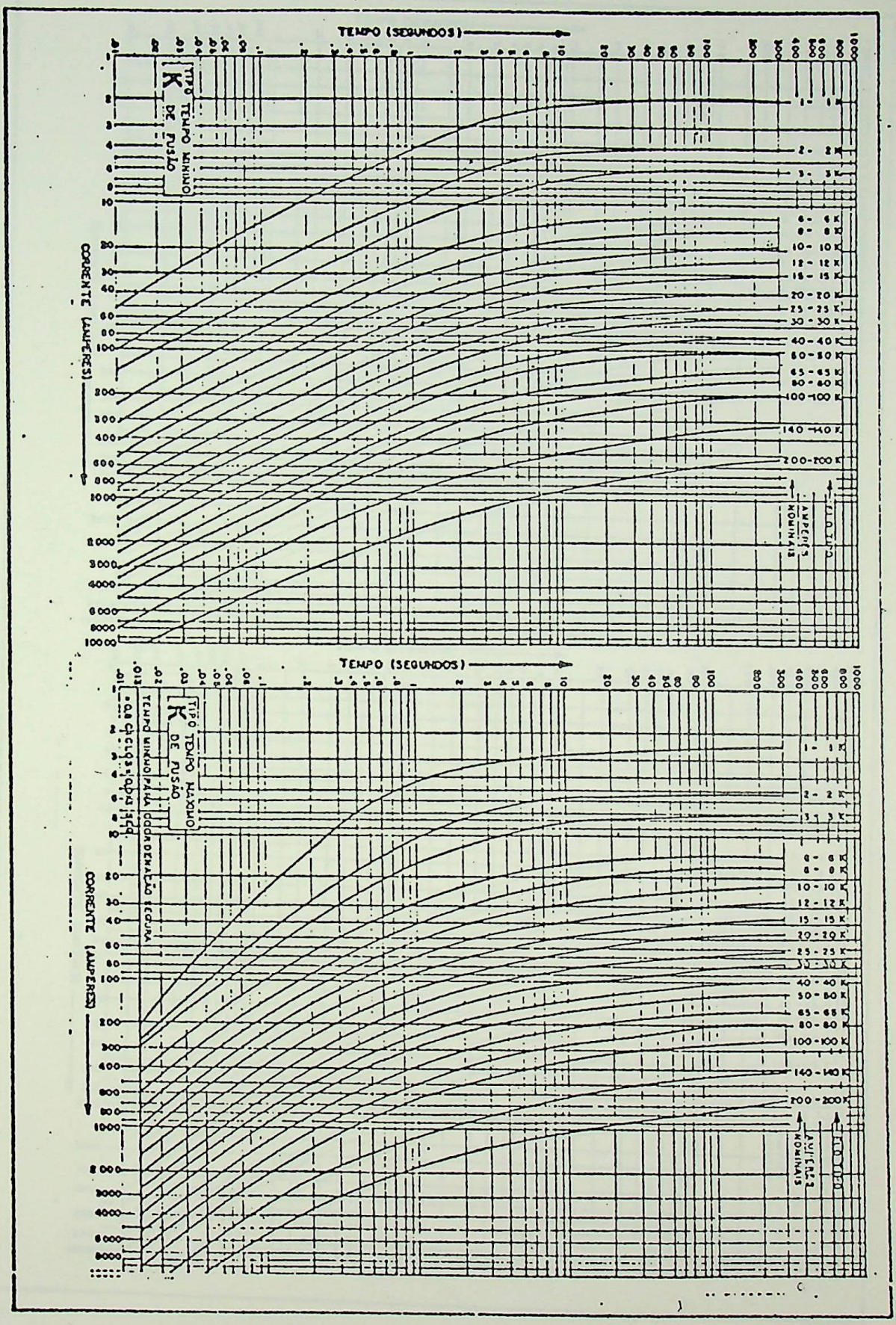


FIGURA 5- CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS ELOS FUSÍVEIS TIPO K

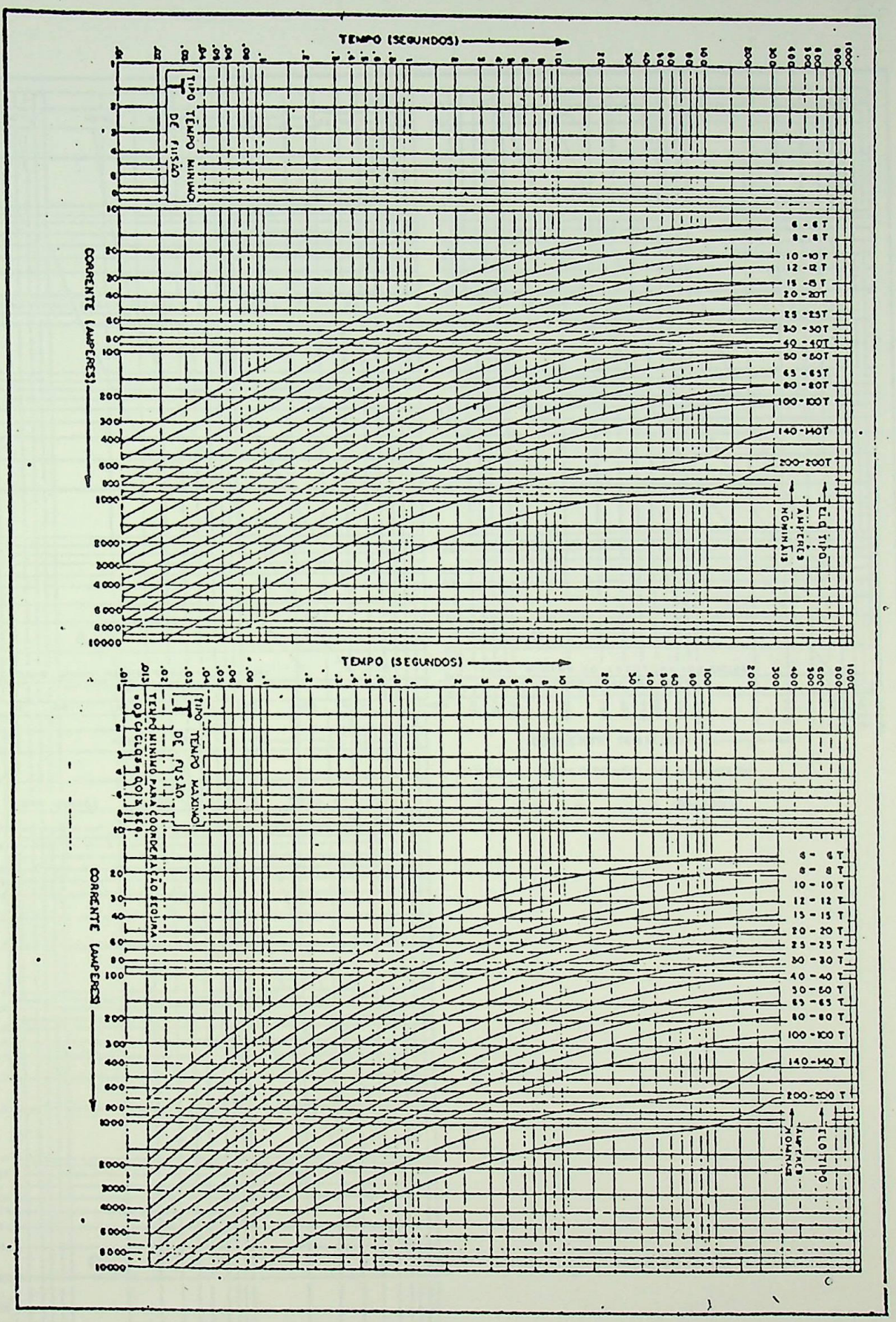


FIGURA 6- CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS ELOS FUSÍVEIS TIPO T

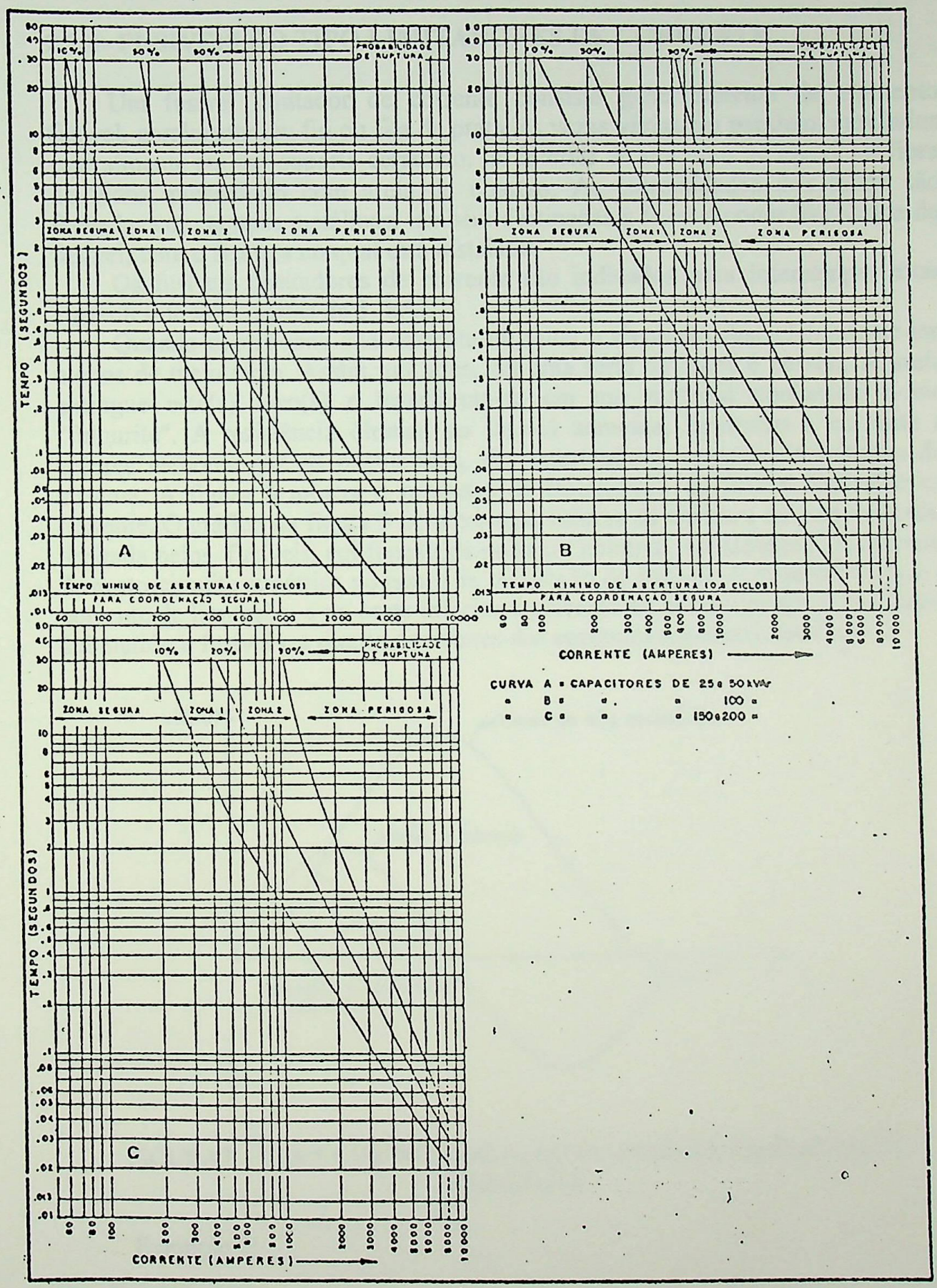


FIGURA 7- CURVAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA DA CAIXA

2.2.4- FUSÍVEIS DO TIPO LIMITADORES DE CORRENTE

Um fusível limitador de corrente consiste genericamente de elemento fusível, geralmente um fio ou fita de prata, às vezes várias em paralelo, enrolados espiralmente em um suporte cerâmico, no interior de um tubo de epoxi ou fibra de vidro, preenchido com areia de quartzo. As extremidades dos tubos são fechadas com tampas metálicas, também destinadas a fazer a conexão elétrica do fusível, com o sistema no qual está instalado.

Os fusíveis limitadores de corrente são indicados para interromper altas correntes de falta, acima de 5 [kA].

Quando ocorre uma alta corrente de falta, o elemento fusível funde-se em menos de meio ciclo. Assim, um arco, ou uma série de arcos é gerado. A areia extingue este(s) arco(s) e transforma-se em um material conhecido como "fulgurite". A resistência ôhmica do fusível aumenta, limitando a corrente a valores menores que os presumidos, desconectando o capacitor defeituoso do sistema. A figura 8 mostra o processo de interrupção do fusível limitador de corrente. O gráfico da figura 9 determina os valores da corrente de curto-circuito limitada pelos fusíveis, em função da corrente nominal, considerando a corrente de curto-circuito simétrica no ponto de instalação do fusível. A esquerda tem-se a corrente de limitação, e na parte inferior a corrente de curto-circuito a que ficará submetido o fusível e a direita os valores das correntes nominais dos fusíveis.

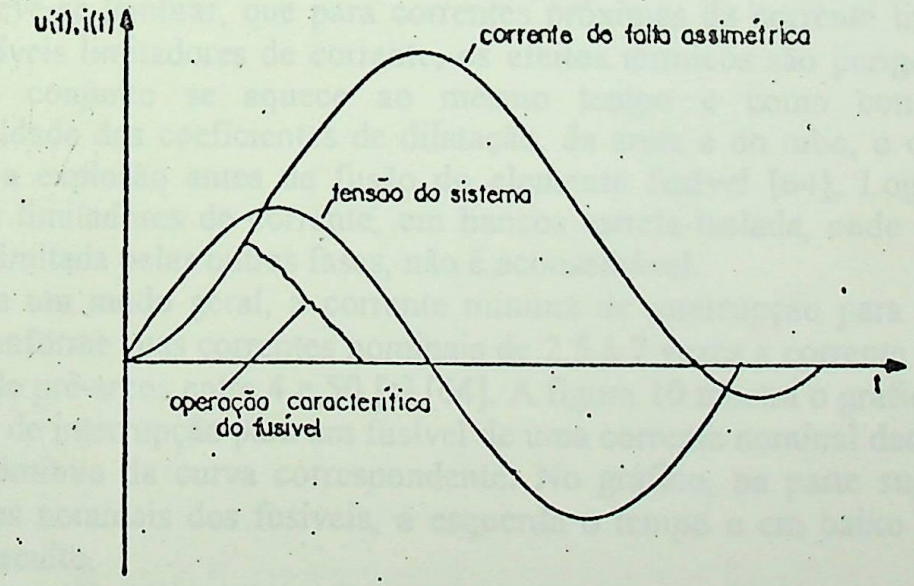


FIGURA 8 - CURVA DE INTERRUPÇÃO DO FUSÍVEL LIMITADOR DE CORRENTE

Exemplo 2:

Utilizando a figura 9.

Para uma corrente de curto-circuito trifásica simétrica, valor eficaz, 10 [kA], um fusível de 100 [A] de corrente nominal limitaria a corrente de curto-circuito a um valor máximo de 9,2 [kA], sem o fusível limitador de corrente, a corrente poderia atingir no primeiro semiciclo um valor de 15,8 [kA] (componente assimétrica com fator de assimetria igual 1,58).

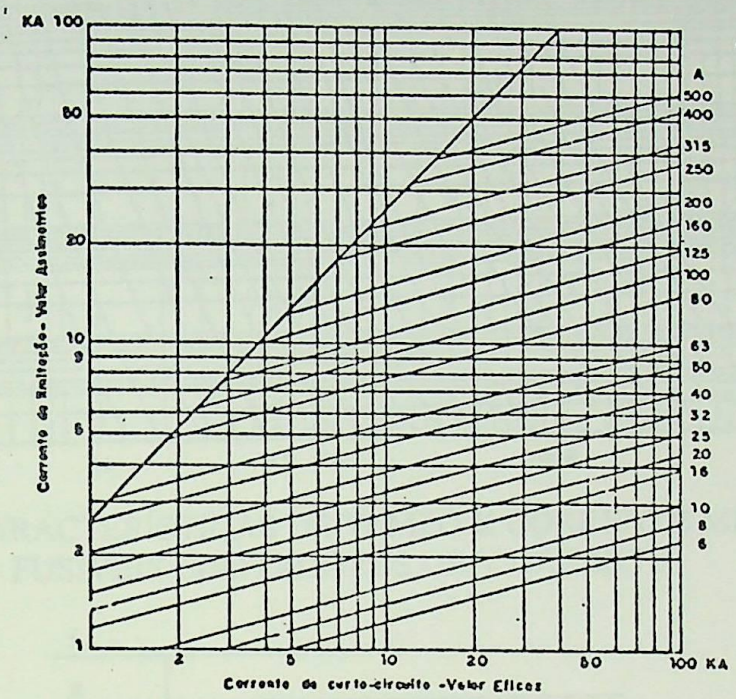


FIGURA 9- CARACTERÍSTICAS DE TEMPO X CORRENTE DOS FUSÍVEIS LIMITADORES DE CORRENTE

Deve-se lembrar, que para correntes próximas da corrente limite de fusão dos fusíveis limitadores de corrente, os efeitos térmicos são perigosos. De fato, todo o conjunto se aquece ao mesmo tempo e como consequência da desigualdade dos coeficientes de dilatação, da areia e do tubo, o conjunto pode chegar a explosão antes da fusão do elemento fusível [64]. Logo, o uso dos fusíveis limitadores de corrente, em bancos estrela-isolada, onde a corrente de falta é limitada pelas outras fases, não é aconselhável.

De um modo geral, a corrente mínima de interrupção para estes fusíveis varia conforme suas correntes nominais de 2,5 à 7 vezes a corrente nominal, com tempo de pré-arcos entre 4 e 50 [s] [64]. A figura 10 mostra o gráfico da corrente mínima de interrupção para um fusível de uma corrente nominal dada pelo fim do traço contínuo da curva correspondente. No gráfico, na parte superior está as correntes nominais dos fusíveis, a esquerda o tempo e em baixo a corrente de curto-circuito.

Uma vantagem da utilização dos fusíveis limitadores de corrente em sistemas de baixa e média tensão que alimentam pequenos bancos de capacitores é que estes protegem os capacitores e os bancos de capacitores contra defeitos internos dos capacitores ou entre fases ou entre fases e terra que possam ocorrer em barramentos de alimentação e o banco de capacitores, ou entre grupos série de fases diferentes do banco (ver figura 11) . No caso de fusíveis de expulsão individuais, o banco ainda deve possuir relés de proteção contra estes tipos de faltas.

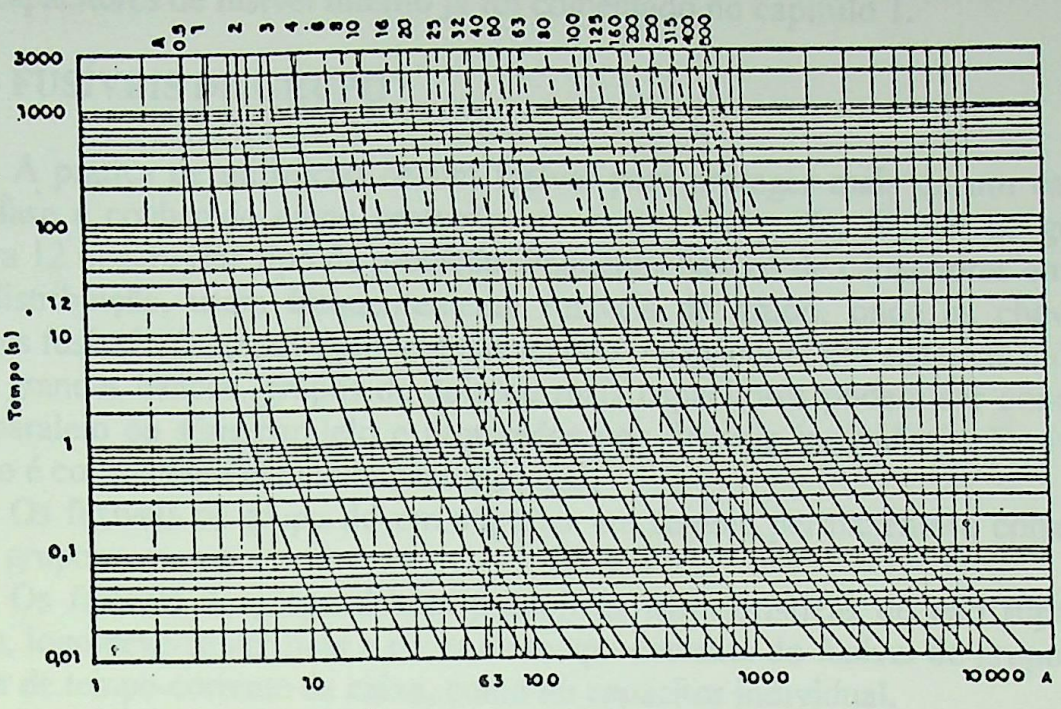


FIGURA 10- CARACTERÍSTICAS DE TEMPO X CORRENTE MÍNIMA DOS FUSÍVEIS LIMITADORES DE CORRENTE

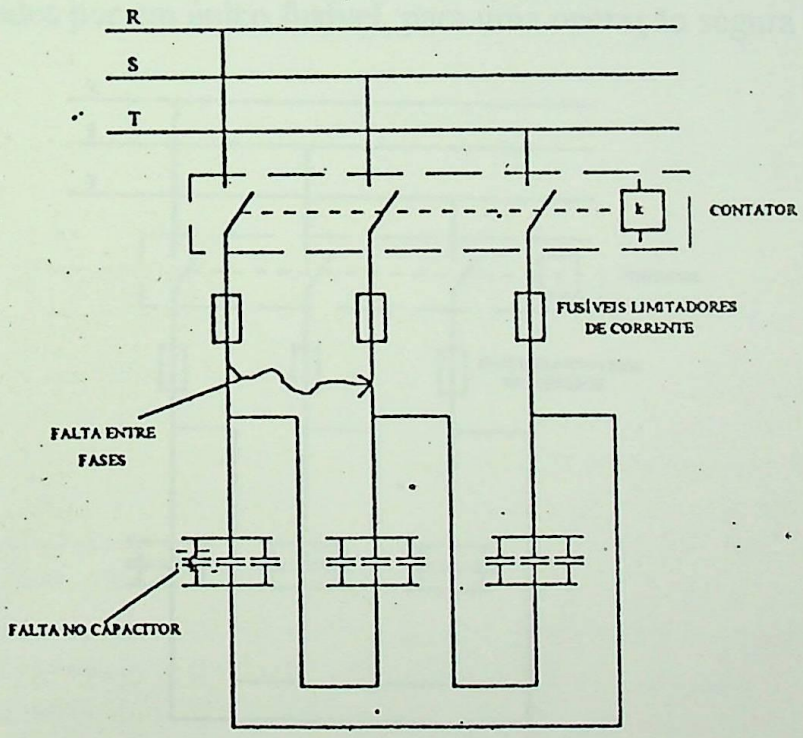


FIGURA 11- BANCO COM CONEXÃO DELTA COM FUSÍVEIS LIMITADORES DE CORRENTE

2.2.5- FUSÍVEIS INTERNOS

Fusíveis internos tem como grande vantagem com relação aos fusíveis externos a continuidade de serviço, mas possui a desvantagem de não mostrar

visualmente o capacitor defeituoso. O princípio de funcionamento com relação aos capacitores de fusível interno já foi comentado no capítulo 1.

2.3 - FUSÍVEIS DE GRUPO

A prática de utilização de um fusível para proteger mais de um capacitor por fase é conhecido como proteção por grupo, ou então, fusível de grupo, a figura 12 mostra este tipo de proteção. Pequenos bancos de capacitores em linhas de distribuição, usam frequentemente fusíveis de grupo, onde as chaves são chaves fusíveis, logo protegendo e chaveando o capacitor. Em sistemas industrias com grandes bancos, grupos de dois ou mais capacitores podem ser conectados em paralelo ou série/paralelo e protegidos por fusíveis individuais. Fusíveis de grupo é considerado como um caso especial.

Os fusíveis de grupo devem suportar em regime permanente a corrente de todo grupo.

Os fusíveis de grupo devem possuir as características de não ruptura da caixa, logo deve-se verificar a curva de tempo-corrente do fusível de grupo com a curva de tempo-corrente da caixa, como no capacitor individual.

Os fusíveis de grupo possuem uma ação mais lenta com relação aos fusíveis individuais.

Se for usado fusível de grupo, deve-se evitar mais de 4 capacitores em paralelo protegidos por um único fusível, para uma operação segura [46].

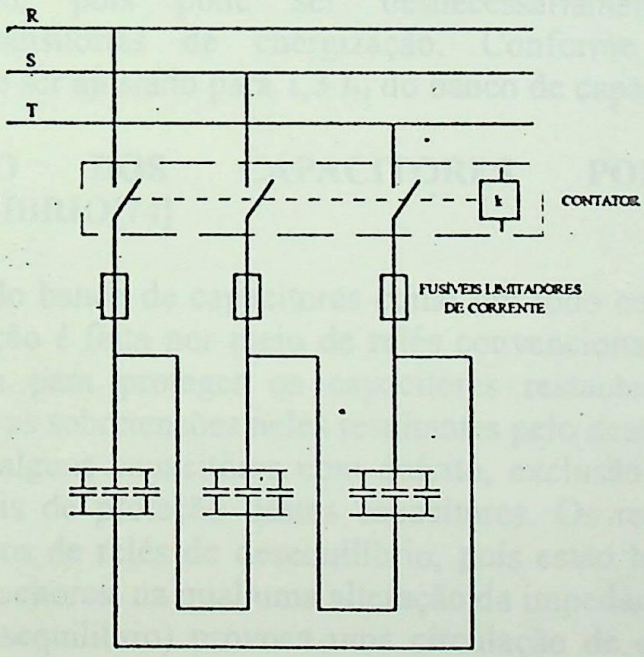


FIGURA 12- CONEXÃO ESTRELA ISOLADA COM FUSÍVEL DE GRUPO

3- RELÉS

Em adição à proteção individual dos capacitores através do uso de fusíveis individuais ou de grupo, tem-se os relés para a proteção dos bancos de capacitores. Os tipos básicos de relés de proteção usados são os de sobrecorrente

e de desequilíbrio. Estes relés devem ser ligados a transformadores de potencial ou de corrente.

3.1- UTILIZAÇÃO DOS RELÉS

Para grandes bancos de capacitores, em que as três fases estão bem separadas uma da outra, um curto-circuito normalmente tem início como um curto de um único grupo série de uma fase; se o número de grupos série do banco de capacitores não for muito pequeno, este tipo de defeito produz uma sobrecorrente de fase muito reduzida e se for permitido o seu prosseguimento, irá envolver mais e mais grupos série da mesma fase, acarretando ao banco de capacitores danos que podem incluir vários capacitores com ruptura da caixa e muitas queimas de fusíveis de proteção individual dos capacitores. Para evitar estes problemas os relés de proteção são utilizados.

3.2- PROTEÇÃO POR RELÉS DE SOBRECORRENTE

Os relés de sobrecorrente instalados na linha de alimentação do banco são essencialmente utilizados para proteção contra defeitos entre fases ou entre fases e terra que possam ocorrer em barramentos de alimentação entre os disjuntores e o banco de capacitores, ou entre grupos série de fases diferentes do banco.

Na aplicação de relés de sobrecorrente o elemento instantâneo não é geralmente usado, pois pode ser desnecessariamente operado pelas sobrecorrentes transitórias de energização. Conforme [22], o relé de sobrecorrente deve ser ajustado para 1,3 I_N do banco de capacitores.

3.3- PROTEÇÃO DOS CAPACITORES POR RÉLE DE DESEQUILÍBRIO[74]

A proteção do banco de capacitores como um todo contra sobretensões na linha de alimentação é feita por meio de relés convencionais de sobretensão. A proteção utilizada para proteger os capacitores restantes de um banco de capacitores contra as sobretensões neles resultantes pelo desequilíbrio ocasionado pela exclusão de alguns capacitores com defeito, exclusão esta realizada pelos fusíveis individuais de proteção destes capacitores. Os relés utilizados nestes casos são chamados de relés de desequilíbrio, pois estão localizados no neutro dos bancos de capacitores, na qual uma alteração da impedância ocorrida em uma ou mais fases (desequilíbrio) provoca uma circulação de corrente pelo neutro, logo acionando o relé de desequilíbrio do banco de capacitores.

Na maioria das instalações a escolha do esquema de proteção por desequilíbrio mais apropriado e mais econômico deve ser feita em conjunto com o projeto do próprio banco de capacitores, a coordenação dos fusíveis, as características dos relés a serem utilizados e o desequilíbrio inerente do banco (desequilíbrio completo, sem exclusão de capacitores).

O desequilíbrio inerente do banco de capacitores e outros erros de detecção podem ser:

a- Desbalanço entre as tensões das três fases do sistema de alimentação;
b- Diferença entre as capacitâncias das três fases, ocasionado pela tolerância de fabricação dos capacitores unitários;
c- Combinação das causas cima. O desequilíbrio inerente pode ser visto pelo relé de proteção como um sinal que pode subtrai ou soma de acordo com os itens a e b, e pode portanto, provocar operações indevidas do relé ou impedir operações necessárias. Para cálculos a favor da segurança deve-se considerar que os desequilíbrio se somam.

Algumas considerações de ordem geral podem ser enfatizada para a proteção por desequilíbrio.

I - A proteção por desequilíbrio pode ser coordenada com os fusíveis de proteção individual dos capacitores, de modo que estes fusíveis operem para desligar um capacitor com defeito antes que o banco de capacitores seja desligado pelo relé;

II - A proteção deve ser suficientemente sensível para operar a sinalização de alarme quando for excluído um capacitor e operar o desligamento do banco quando for excluído um número de capacitores que ocasiona nos capacitores restantes um sobretensão de serviço maiores que a máxima permissível;

IV - Os relés devem ser do tipo retardado, não se deve usar relés instantâneos devido a possibilidade da falsa operação destes relés no caso de transitórios que são características de qualquer banco de capacitores. A proteção por desequilíbrio deve possuir um tempo relativamente longo para evitar:

* Correntes de inrush;
* Faltas ocorridas no sistema;
* Descargas atmosféricas;
* Chaveamento de equipamentos próximos ao banco de capacitores;
* Pequenos desequilíbrios de tensão, estes desequilíbrios estão dentro dos limites toleráveis;
* Pequenos desequilíbrios devido à própria variação da capacitância do capacitor dentro dos limites aceitáveis;
* A não simultaneidade da operação dos pólos do disjuntor.

Nas instalações, normalmente um tempo de retardo de 0,5 [s] é satisfatória para atender os casos acima mencionados.

VI - A proteção não deve permitir o religamento automático do banco de capacitores.

VII - Para minimizar os efeitos do desequilíbrio inerente do banco de capacitores, devido a desequilíbrios do sistema de alimentação e/ou à

tolerância de fabricação dos capacitores, o ajuste do sistema de proteção devem ser:

a- Alarme: ajustado para operar com uma corrente de neutro ocasionado pelo desligamento de um capacitor; o retardo de tempo deve ser suficiente para evitar operações indevidas em caso de perturbações externas (0,5 [s]);
b- Desligamento: ajustado para operar com uma corrente de neutro que esteja entre a exclusão do capacitor crítico e a exclusão do capacitor imediatamente anterior; o capacitor crítico é aquele cuja exclusão provoca nos restantes uma sobretensão maior que a máxima admissível, normalmente 10% (ver equações (5), (6) e (7) e tabela 2).

4- RELÉS TÉRMICOS

Relés térmicos são ocasionalmente usados, como suplemento a outros tipos de proteções dos bancos de capacitores. São usados para detectar operações anormais de temperatura, como o aparecimento de harmônicos no banco de capacitores. Estes harmônicos poderão, dependendo de sua intensidade, provocar aquecimento excessivo na unidade capacitiva e uma correta operação do relé térmico deve ser efetuada antes que ocorra danos na unidade capacitiva. Segundo [3], a corrente de ajuste deve ser de 1,35 vezes a corrente nominal do banco de capacitores.

5- PÁRA-RAIOS PARA PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES[79]

Os pára-raios são equipamentos de potência que contribuem para confiabilidade, economia e continuidade de serviço nos sistemas de potência.

Os equipamentos de uma substação podem ser solicitados por sobretensões provenientes de descargas atmosféricas, impulsos de manobra e por sobretensões na frequência nominal. Com o objetivo de impedir que estes equipamentos sejam danificados, sendo o pára-raios o equipamento mais adequado para esta finalidade, pois, atuam como limitadores de tensão, impedindo que tensões anormais alcançem o equipamento o qual está protegendo.

Duas características devem ser observadas na especificação do pára-raios: a tensão nominal e a capacidade de condução de corrente no momento do defeito.

Uma regra prática para especificação da tensão do para-ráios de carbureto de silício ou a óxido metálico sem centelhadores é [79]:

PARA SISTEMAS MULTI-ATERRADOS

$$U_N = 0,84 U_{FF} \qquad (10)$$

PARA SISTEMAS ISOLADOS

$$U_N = 1,05 U_{FF} \qquad (11)$$

onde:

U_N - Tensão nominal do pára-raios;
U_{FF} - Tensão fase-fase do sistema;

A corrente de descarga de um pára-raios conforme [80] é:

$$I_{DES} = \frac{2,4.U_I}{Z_L + Z_{PR}} \qquad (12)$$

onde:

I_{DES} - Corrente de descarga do pára-raios;
U_I - Tensão suportável de impulso do sistema (BIL);
Z_L - Impedância do surto;
Z_{PR} - Impedância do pára-raios.

Determinado os valores de tensão nominal e a corrente de descarga suportável do pára-raios, passa-se através das tabelas dos fabricantes a encontrar o pára-raios adequado.

6- ESQUEMAS DE PROTEÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

As figuras 14, 15, 16, 17 e 18 mostram esquemas de ligações de algumas conexões de banco de capacitores [74] [46].

Para a conexão triângulo (figura 14), conforme [22], o relé de sobrecorrente deve ser ajustado para operar em 1,3 I_N do banco de capacitores.

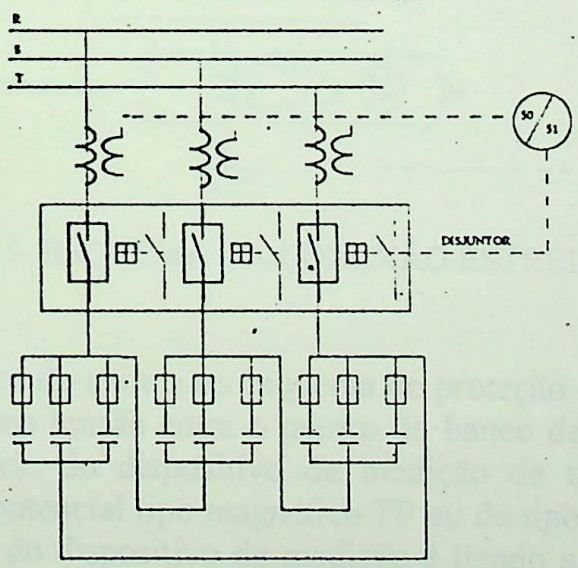


FIGURA 14- ESQUEMA DE LIGAÇÃO TRIÂNGULO COM RELÉS DE SOBRECORRENTE

Na figura 15, o secundário do TC para a conexão estrela-aterrada, alimenta um relé de sobrecorrente com retardo de tempo (51N) ou um resistor variável R

ligado em paralelo com um relé de sobretensão (59N), provido de filtro de terceiros harmônicos.

O relé 51N ou 59N opera um relé de desligamento com rearme elétrico ou manual (relé de bloqueio - 86) que abre a chave de manobra do banco de capacitores e mantém bloqueado o seu posterior fechamento, ao mesmo tempo em que curto-circuita o TC ligado ao neutro do banco de capacitores, desenergizando o relé. A conexão estrela-aterrada com proteção pela corrente de neutro mostrado na figura 15, deve ter seu relé de neutro ajustado conforme o item 3.3.VII [74]. O relé de sobrecorrente de fase deve ser ajustado para operar em 1,3 I_N do banco de capacitores [22].

A corrente de neutro pode ser calculada para exclusão N_{CE} capacitores a partir da equação 5 do capítulo 4.

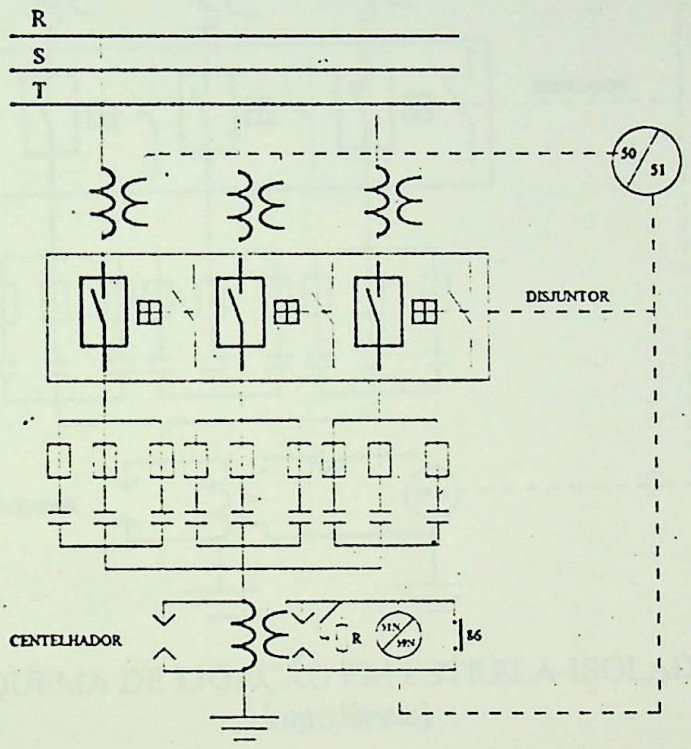


FIGURA 15- ESQUEMA DA CONEXÃO ESTRELA-ATERRADA

Um desbalanço do neutro no esquema de proteção da figura 16, ocasiona o aparecimento de uma tensão entre o neutro do banco de capacitores e a terra, e portanto no primário do dispositivo de medição de tensão ligado ao neutro (transformador de potencial tipo magnético TP ou do tipo capacitivo TPC).

O secundário do dispositivo de medição é ligado a um relé de sobretensão (59N) com retardo de tempo (0,5 [s]) e provido de filtro de terceiros harmônicos.

O relé de sobretensão (59N) opera um relé de desligamento de rearme elétrico ou manual (86) que comanda a chave de manobra do banco de manobra do banco de capacitores e desenergiza o próprio relé 59 N.

A proteção da conexão estrela-isolada na figura 16, deve ter seu relé de neutro ajustado conforme o item 3.3.VII [74]. O relé de sobrecorrente de fase deve ser ajustado para operar em 1,3 I_N do banco de capacitores [22].

A tensão entre o neutro do banco de capacitores e a terra pode ser calculada para exclusão N_{CE} capacitores a partir da equação 10 do capítulo 4.

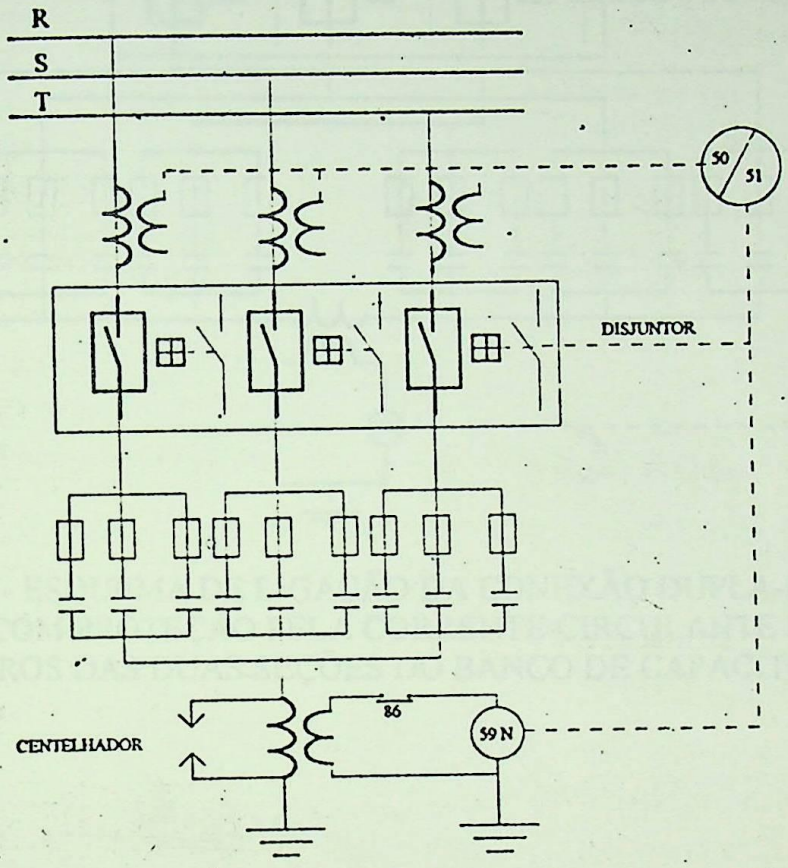


FIGURA 16 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO EM ESTRELA-ISOLADA (com TP de alta impedância)

A conexão dupla-estrela-isolada pode ser protegida pelo esquema da figura 17, onde o banco de capacitores é dividido em duas seções com os neutros interligados por meio de um transformador de corrente. O desequilíbrio de uma fase de uma das seções ocasiona a circulação de uma corrente pelo neutro, cujo secundário alimenta um relé de sobrecorrente (51N) com um tempo de retardo (0,5 [s]).

A proteção da conexão dupla-estrela-isolada na figura 17, deve ter seu relé de neutro ajustado conforme o item 3.3.VII [74]. O relé de sobrecorrente de fase deve ser ajustado para operar em 1,3 I_N do banco de capacitores [22].

A corrente entre os neutros das duas seções do banco de capacitores pode ser calculada de acordo com saída de operação de unidades capacitivas defeituosas a partir da equação 14 do capítulo 4.

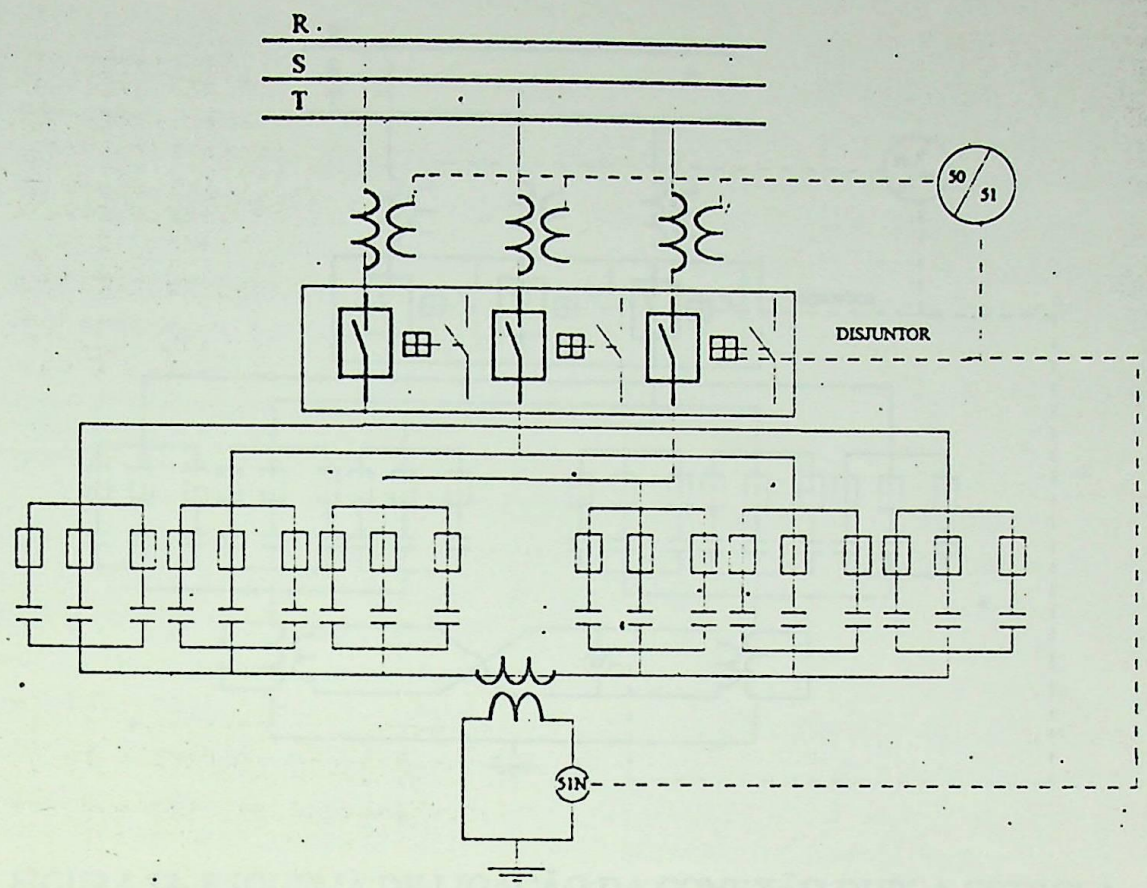


FIGURA 17- ESQUEMA DE LIGAÇÃO DA CONEXÃO DUPLA-ESTRELA-ISOLADA COM PROTEÇÃO PELA CORRENTE CIRCULANTE ENTRE OS NEUTROS DAS DUAS SEÇÕES DO BANCO DE CAPACITORES

O esquema de proteção da conexão dupla-estrela-aterrada é mostrado na figura 18. O banco de capacitores é dividido em duas seções cujos neutros são aterrados em um ponto comum através de dois diferentes transformadores de corrente.

Os secundários dos dois TC's são ligados em oposição e alimentam um relé de sobrecorrente de proteção diferencial (87), de modo que o mesmo não é sensível a qualquer situação externa que afete de maneira similar as duas seções do banco de capacitores, portanto o banco de capacitores é insensível aos desbalanços de tensão da fonte.

O secundário do TC de cada fase alimenta um relé de sobrecorrente (51) com um tempo de retardo de 0,5 [s].

A proteção da conexão dupla estrela aterrada na figura 18, deve ter seu relé de desequilíbrio ajustado conforme o item 3.3.VII [74]. O relé de sobrecorrente de fase deve ser ajustado para operar em 1,3 I_N do banco de capacitores [22].

A corrente entre os neutros das duas seções do banco de capacitores pode ser calculada a partir da equação 5 do capítulo 4 de acordo com número de unidades capacitivas defeituosas que sairam de operação.

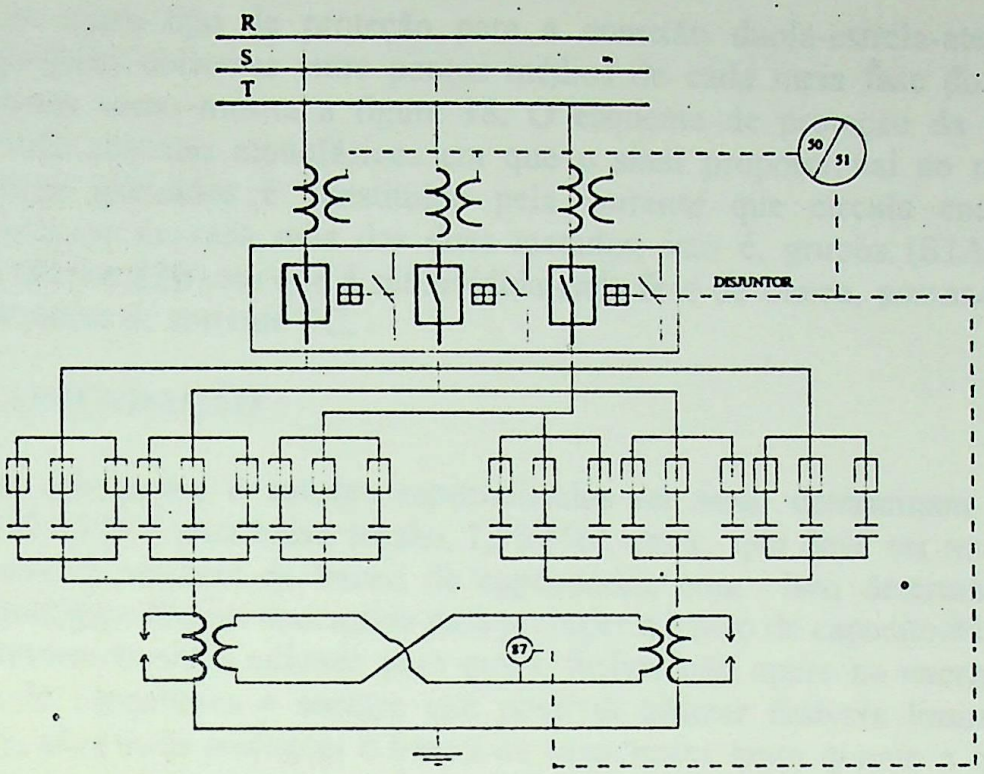


FIGURA 18- ESQUEMA DE LIGAÇÃO DA CONEXÃO DUPLA-ESTRELA-ATERRADA COM PROTEÇÃO PELA DIFERANÇA ENTRE CORRENTES CIRCULANTES DOS NEUTROS

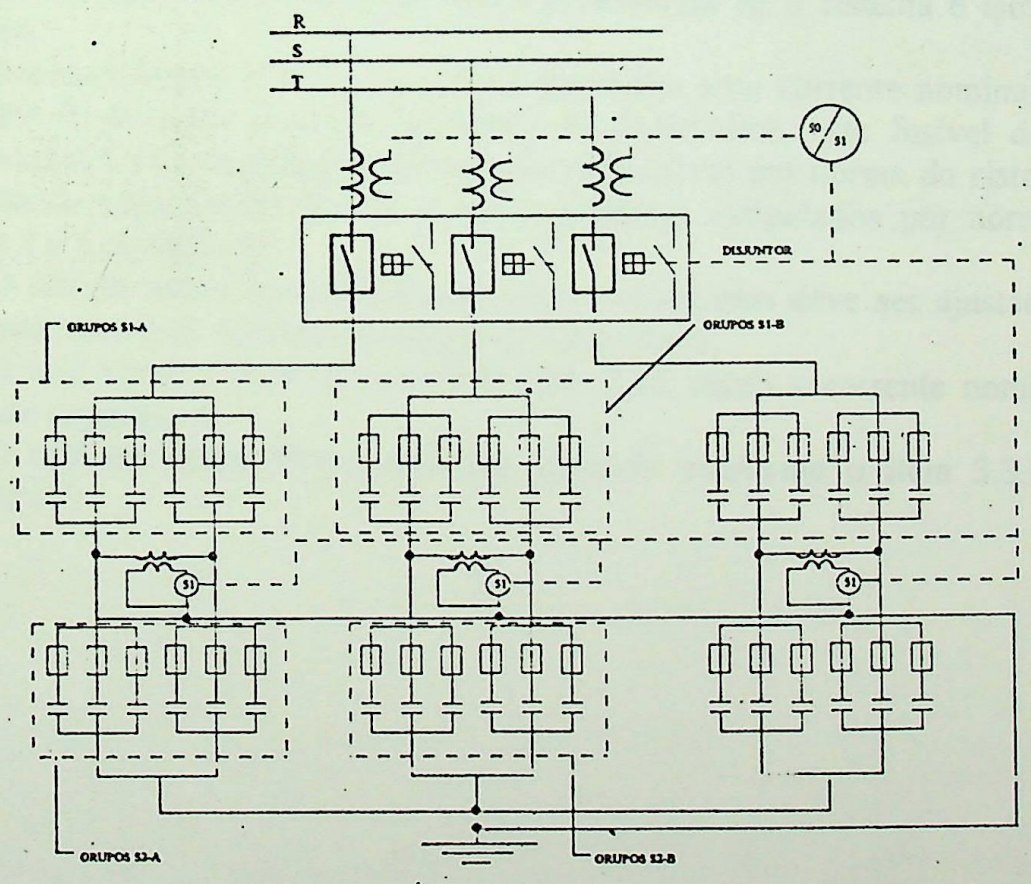


FIGURA 18- ESQUEMA DE LIGAÇÃO DA CONEXÃO DUPLA-ESTRELA-ATERRADA COM PROTEÇÃO PELA CORRENTE CIRCULANTE ENTRE NEUTROS

Um outro tipo de proteção para a conexão dupla-estrela-aterrada é a proteção pelas correntes entre pontos médios de cada meia fase do banco de capacitores, como mostra a figura 18. O esquema de proteção da figura 18, possui três sistemas monofásicos em que o sinal proporcional ao número de capacitores excluídos é constituído pela corrente que circula entre pontos intermediários de cada uma das duas metades, isto é, grupos (S1A+ S2A) e grupos (S1B e S2B) em que é subdividida cada fase do banco, passando por um transformador de corrente TC.

7-RECOMENDAÇÃO

Os fabricantes e autores especializados na área, determinam um fator fusível (1,65 [43] para baixa tensão, 1,35 [56], etc.), que deve ser multiplicado pela corrente nominal do banco de capacitores, com isso determinando em primeira etapa o fusível necessário para proteger o banco de capacitores.

Deve-se tomar o cuidado para que o fusível não opere na energização de bancos de capacitores e sempre que possível utilizar fusíveis limitadores de corrente, pois estes protegem o banco de capacitores tanto quanto a queima de unidades capacitivas como a curto-circuitos (fase-terra ou fase-fase). Na conexão estrela-isolada não se deve utilizar fusíveis limitadores de corrente.

O capítulo IV de conexões de bancos de capacitores determina qual conexão que deve-se utilizar no banco de capacitores, mas, caso a corrente de curto-circuto não seja adequada para operar o fusível, deve-se então, alterar a conexão do banco de capacitores. Deve-se observar se o sistema é isolado ou aterrado.

Recomendamos procurar o fusível que tenha uma corrente nominal acima do valor da corrente nominal do banco de capacitores, este fusível deve ser dimensionado para suportar: a sobretensão admissível por norma do sistema e a variação da capacitância do banco de capacitores estipulados por norma (ver tabelas 1 e 2 capítulo 6).

O relé de sobrecorrente temporizado e instantâneo deve ser ajustado para 1,3 vezes a corrente nominal do banco de capacitores.

O relé térmico deve ser ajustado para 1,35 vezes a corrente nominal do banco de capacitores.

O relé de desequilíbrio deve ser ajustado conforme o item 3.3.VII do capítulo IV.

CAPÍTULO VI

CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES

de Engenharia
Biblioteca
UÁ
AM
Itajubá - EFEI

CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES

1-INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo efetuar análise relativa ao chaveamento dos bancos de capacitores (energização e desenergização), visando identificar quais os fenômenos de sobrecorrente e sobretensão que podem causar danos tanto nas próprias unidades capacitivas do banco, como em outros equipamentos ligados ao sistema em questão. Estes mesmos fenômenos têm uma importância fundamental na especificação dos equipamentos que efetuam manobras em bancos de capacitores.

Os fatores que influenciam a magnitude e a frequência dos transitórios envolvidos durante o chaveamento dos bancos de capacitores, entre outros, são:

- Tensão de operação;
- Potência do banco de capacitores;
- Indutância e capacitância do banco de capacitores;
- Indutância e capacitância da linha entre a fonte e o banco de capacitores;
- Presença de mais de um banco de capacitores na mesma barra;
- Valor da tensão do sistema no momento de sua energização.

Neste capítulo, os fenômenos transitórios de chaveamento de capacitores, serão separados em dois itens:

a - Transitórios causados pela energização de bancos de capacitores;
b - Transitórios causados pela desenergização de bancos de capacitores.

2- TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES

No momento da energização de um banco de capacitores a partir de uma fonte de corrente alternada, irá circular pelo circuito uma corrente elevada, oscilatória e de curta duração. Quando o banco de capacitores é energizado, a corrente circulante é limitada apenas pela impedância da fonte e os cabos de alimentação existentes entre a fonte e o banco de capacitores. A parcela de maior amplitude desta corrente transitória de alta frequência ocorre e termina em um pequeno intervalo de tempo (menor que um ciclo na frequência industrial). A amplitude atingida por este transitório é máxima quando a tensão da fonte passar pelo seu valor máximo (valor de pico), no instante da energização. As correntes transitórias de um banco de capacitores trifásico em estrela aterrada, caso a fonte também esteja conectada em estrela-aterrada, possue as mesmas características do caso de energização de banco de capacitores conectado entre fases e neutro (caso monofásico).

A figura 1 representa um circuito típico para o estudo de transitórios e a figura 2 o diagrama unifilar. A reatância indutiva X_{TH1} e a resistência R_{TH1}, representam o sistema elétrico equivalente, constituído, pela linha, transformador e fonte de energia (equivalente de Thevenin), sendo X_{C1} a reatância capacitiva do banco de capacitores propriamente dito.

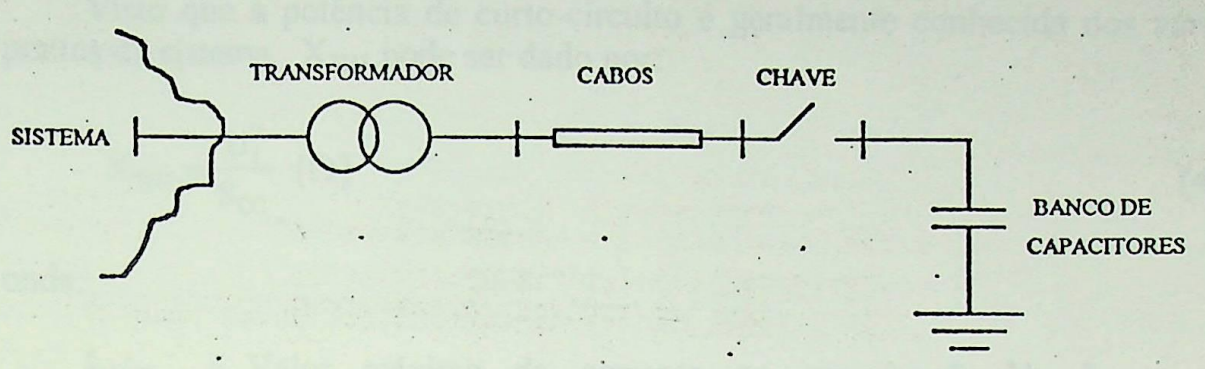


FIGURA 1- CIRCUITO MONOFÁSICO EQUIVALENTE REPRESENTANDO A ENERGIZAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES MONOFÁSICO

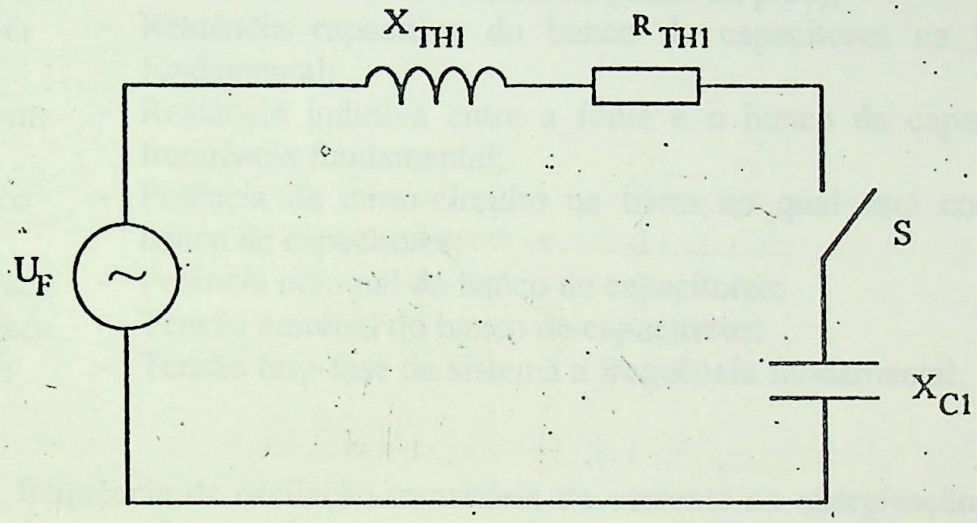


FIGURA 2- DIAGRAMA MONOFÁSICO EQUIVALENTE DA FIGURA 1

A máxima corrente de energização de um banco de capacitores (inrush) ([1], [45]) em um sistema, admitindo-se que o circuito do banco de capacitores é energizado no instante em que acontece o pico da tensão (sem a presença de outros bancos de capacitores), é de modo simplificado apresentado na equação (1). Na equação (1), desconsidera-se a resistência do sistema.

$$I_{MÁX} = I_0 \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{TH1}}} \right] [A] \qquad (1)$$

onde:

$$I_0 = \frac{U_{MÁX}}{X_{C1} - X_{TH1}} [A] \qquad (2)$$

e,

$$X_{C1} = \frac{U_{BCN}^2}{Q_{BCN}} \ [\Omega] \qquad (3)$$

Visto que a potência de curto-circuito é geralmente conhecida nos vários pontos do sistema, X_{TH1} pode ser dado por:

$$X_{TH1} = \frac{U_1^2}{S_{CC}} \ [\Omega] \qquad (4)$$

onde:

- $I_{MÁX}$ - Valor máximo da corrente na energização do banco de capacitores;
- I_N - Valor da corrente nominal do banco de capacitores;
- $U_{MÁX}$ - Tensão fase-neutro do sistema (valor de pico);
- X_{C1} - Reatância capacitiva do banco de capacitores na frequência fundamental;
- X_{TH1} - Reatância indutiva entre a fonte e o banco de capacitores na frequência fundamental;
- S_{CC} - Potência de curto-circuito na barra no qual está conectado o banco de capacitores;
- Q_{BCN} - Potência nominal do banco de capacitores;
- U_{BCN} - Tensão nominal do banco de capacitores;
- U_1 - Tensão fase-fase do sistema a frequência fundamental.

A frequência de oscilação transitória da corrente na energização do banco de capacitores pode ser calculada através da equação (5) ([1], [45]).

$$f_{MÁX} = f.\sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{TH1}}} \qquad (5)$$

onde:

- $f_{MÁX}$ - Frequência máxima de oscilação da corrente na energização do banco de capacitores;
- f - Frequência industrial.

Exemplo:

A corrente máxima de energização considerando-se o sistema da figura 1 com os seguintes dados (ver anexo 11).

A potência de curto-circuito do sistema (S_{CC}) - 1 [GVA];

Transformador:

138 / 13,8 [kV]
10 [MVA]
X=10%;
R= 0,3%.

Cabos

Comprimento - 15 [m];
Reatância - 0,179 [m.Ω/m];
Resistência - 0,4002 [m.Ω/m].

Banco de capacitores

Potência - 3 [MVAr];

A corrente máxima será:

$$I_{MÁX} = \frac{7967.\sqrt{2}}{63,48 - 2,0926}\left[1 + \sqrt{\frac{63,48}{2,0926}}\right] = 1194 \text{ [A]}$$

A figura 3 mostra uma simulação com os valores expressos no exemplo 1 considerando o efeito resistivo e observa-se que a equação 1 apresenta uma boa aproximação para a determinação da corrente de "inrush" no momento da energização do banco de capacitores. A diferença existente entre a equação 1 e a simulação mostrada na figura 3 do exemplo 1 é de 0,75%.

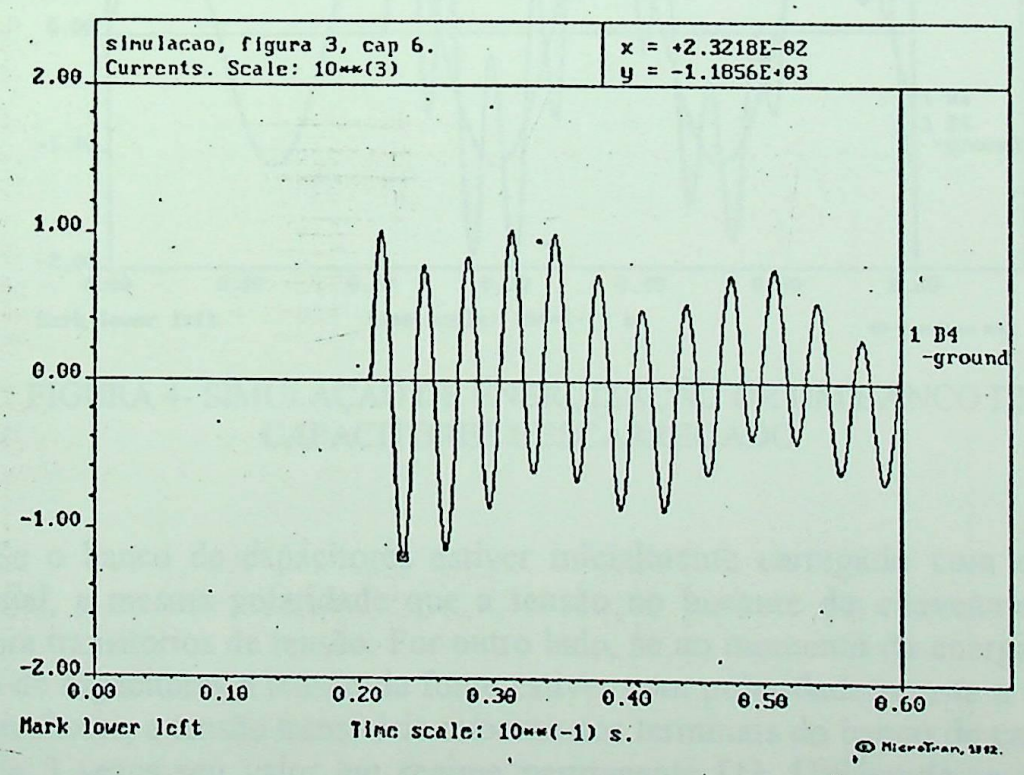


FIGURA 3- SIMULAÇÃO DO EXEMPLO.1, ENERGIZAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES

Ainda analisando-se a figura 1, pode-se deduzir que, a tensão máxima alcançada na energização de um banco de capacitores será:

$$U_{CMÁX} = U_{C(0)} + 2.\left[U_{MÁX} - U_{C(0)}\right] \qquad (6)$$

onde:

$U_{C(0)}$ - Tensão inicial no capacitor;
$U_{MÁX}$ - Tensão máxima instantânea da fonte.

Na equação (6), percebe-se que se o capacitor estiver inicialmente descarregado, sua tensão transitória máxima pode alcançar teoricamente duas vezes o valor de sua tensão em regime permanente [1], a figura 3 mostra a tensão máxima no momento da energização de um banco de capacitores descarregado, utilizando-se o exemplo 1. A diferença existente entre a equação 6 e a simulação mostrada na figura 4 é de 7%.

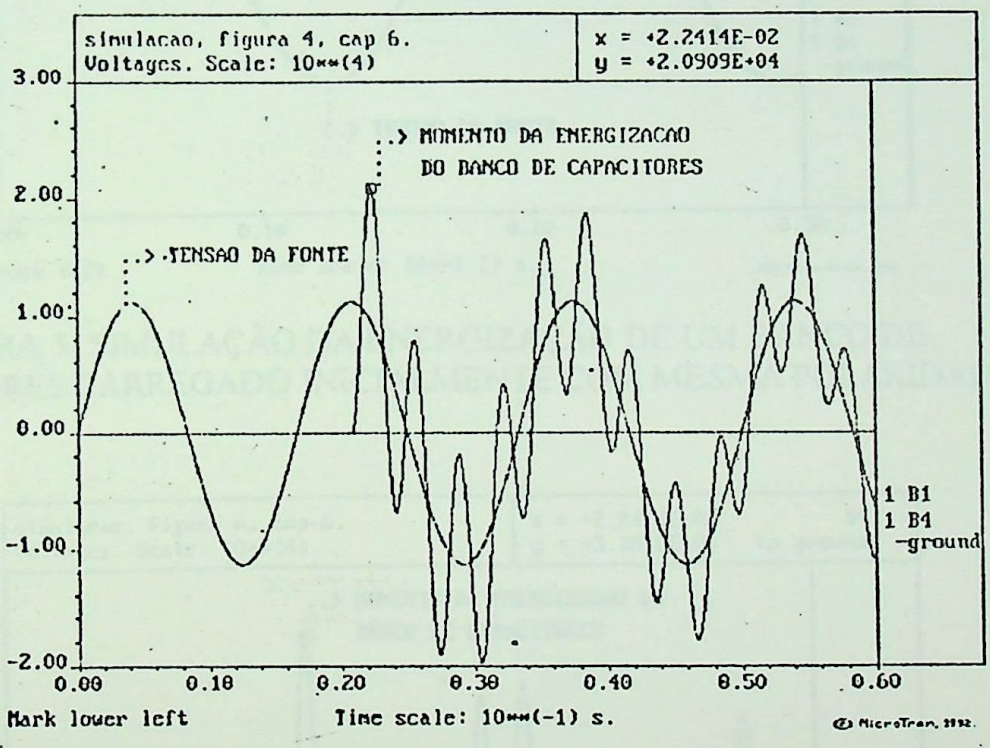


FIGURA 4- SIMULAÇÃO DE ENERGIZAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES DESCARREGADO

Se o banco de capacitores estiver inicialmente carregado com o mesmo potencial, e mesma polaridade que a tensão no instante do chaveamento, não ocorrerá transitórios de tensão. Por outro lado, se no momento da energização do banco de capacitores a tensão da fonte estiver com polaridade oposta a do banco de capacitores, a tensão transitória máxima nos terminais do banco de capacitores será de 3 vezes seu valor em regime permanente [1]. Utilizando-se o mesmo sistema do exemplo 1 (ver anexo 11), tem-se os resultados das simulações nas figuras 5 e 6. Observa-se na figura 5 que não ocorreu transitórios de tensão no

momento da energização do banco de capacitores descarregado, já na figura 6 com o banco carregado, ocorreu transitórios de tensão no momento da energização.

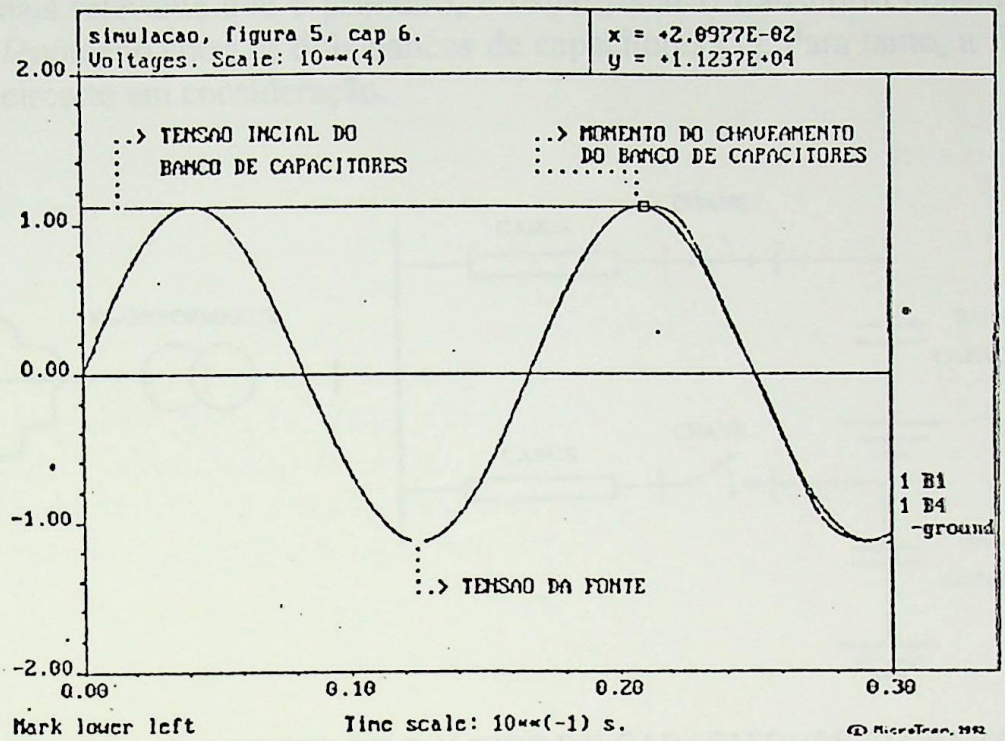


FIGURA 5- SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES CARREGADO INICIALMENTE COM MESMA POLARIDADE

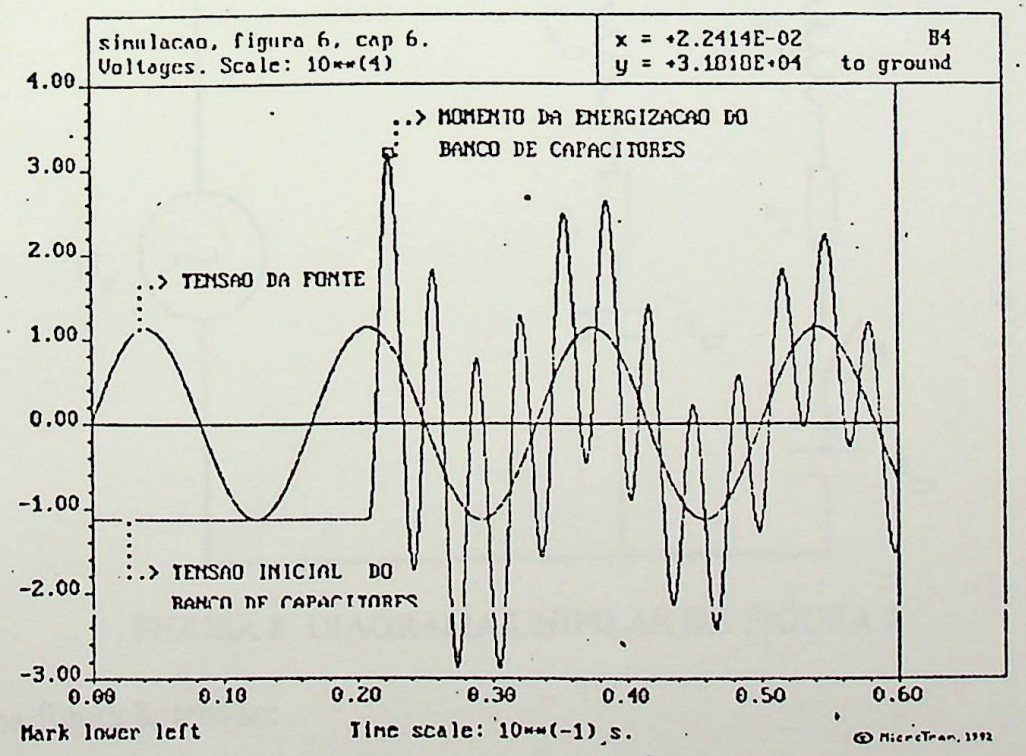


FIGURA 6- SIMULAÇÃO DE ENERGIZAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES CARREGADO INICIALMENTE COM POLARIDADE OPOSTA

2.2- ENERGIZAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM PARALELO

Quando um banco de capacitores já se encontra energizado, e um segundo banco de capacitores é chaveado, dois transitórios distintos ocorrem. O primeiro envolve a fonte e o banco de capacitores que está sendo energizado e o segundo, envolve os bancos de capacitores (energizado e em energização). O segundo efeito é mais relevante que o primeiro, é usual tratar o transitório considerando apenas o fenômeno entre os dois bancos de capacitores [1]. Para tanto, a figura 7 mostra o circuito em consideração.

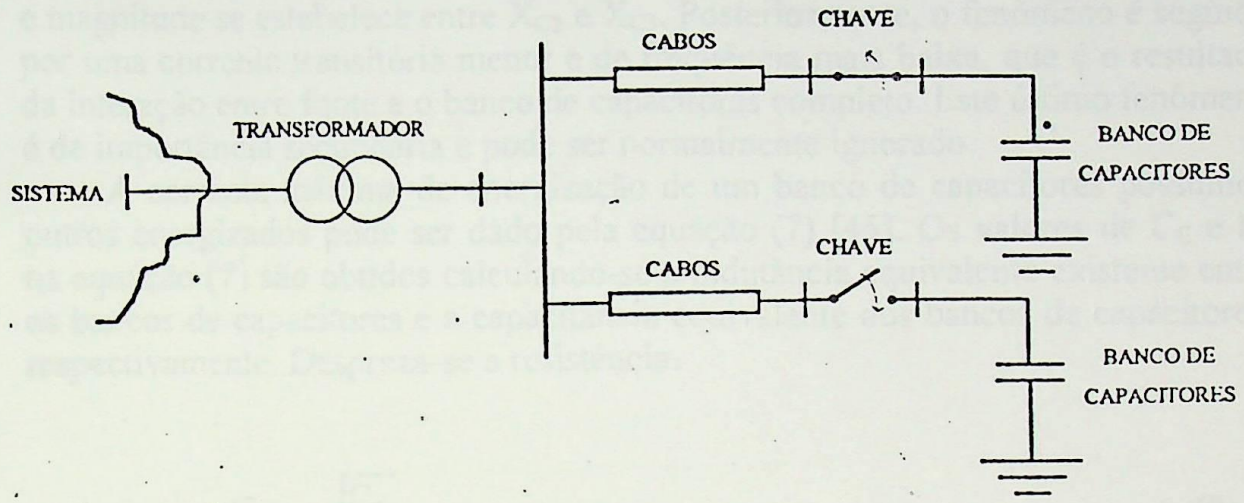


FIGURA 7- CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES EM PARALELO

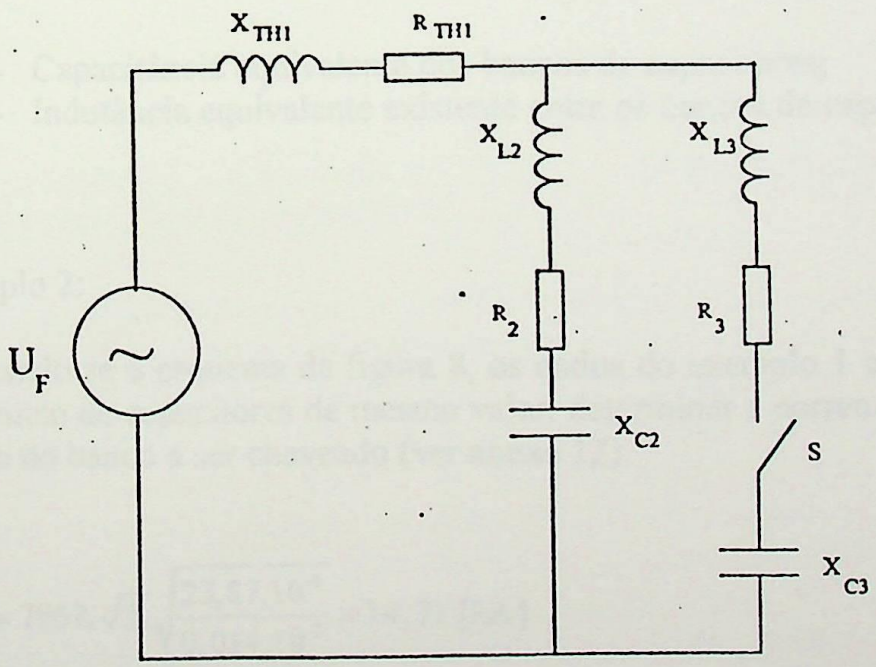


FIGURA 8- DIAGRAMA UNIFILAR DA FIGURA 7

onde, na figura 8, tem-se:

U_F - Tensão máxima da fonte fase-neutro;

X_{L2} - Reatância indutiva dos cabos do banco de capacitores energizado;
R_2 - Resistência do cabo do banco de capacitores energizado;
X_{C2} - Reatância do banco de capacitores energizado;
X_{L3} - Reatância indutiva dos cabo do banco de capacitores a ser energizado;
R_3 - Resistência do cabo do banco de capacitores a ser energizado;
X_{C3} - Reatância do banco de capacitores a ser energizado.

Usualmente, as reatâncias indutivas X_{L2} e X_{L3} são bastante pequenas se comparada ao valor de X_{THI}, então uma corrente equalizadora de alta frequência e magnitude se estabelece entre X_{C2} e X_{C3}. Posteriormente, o fenômeno é seguido por uma corrente transitória menor e de frequência mais baixa, que é o resultado da interação entre fonte e o banco de capacitores completo. Este último fenômeno é de importância secundária e pode ser normalmente ignorado.

A corrente máxima de energização de um banco de capacitores possuindo outros energizados pode ser dado pela equação (7) [45]. Os valores de C_E e L_E na equação (7) são obtidos calculando-se a indutância equivalente existente entre os bancos de capacitores e a capacitância equivalente dos bancos de capacitores, respectivamente. Despreza-se a resistência.

$$I_{MÁX} = \sqrt{2}.U_F.\sqrt{\frac{C_E}{L_E}} \qquad (7)$$

onde:

C_E - Capacitância equivalente dos bancos de capacitores;
L_E - Indutância equivalente existente entre os bancos de capacitores.

Exemplo 2:

Utilizando-se o esquema da figura 8, os dados do exemplo 1 e inserindo-se um outro banco de capacitores de mesmo valor, determinar a corrente máxima de energização do banco a ser chaveado (ver anexo 12).

$$I_{MÁX} = 7967.\sqrt{2}.\sqrt{\frac{23,87.10^{-6}}{0,014.10^{-6}}} = 14,71\ [kA]$$

A figura 9, mostra o resultado de uma simulação para a corrente de energização do segundo banco de capacitores da figura 8.

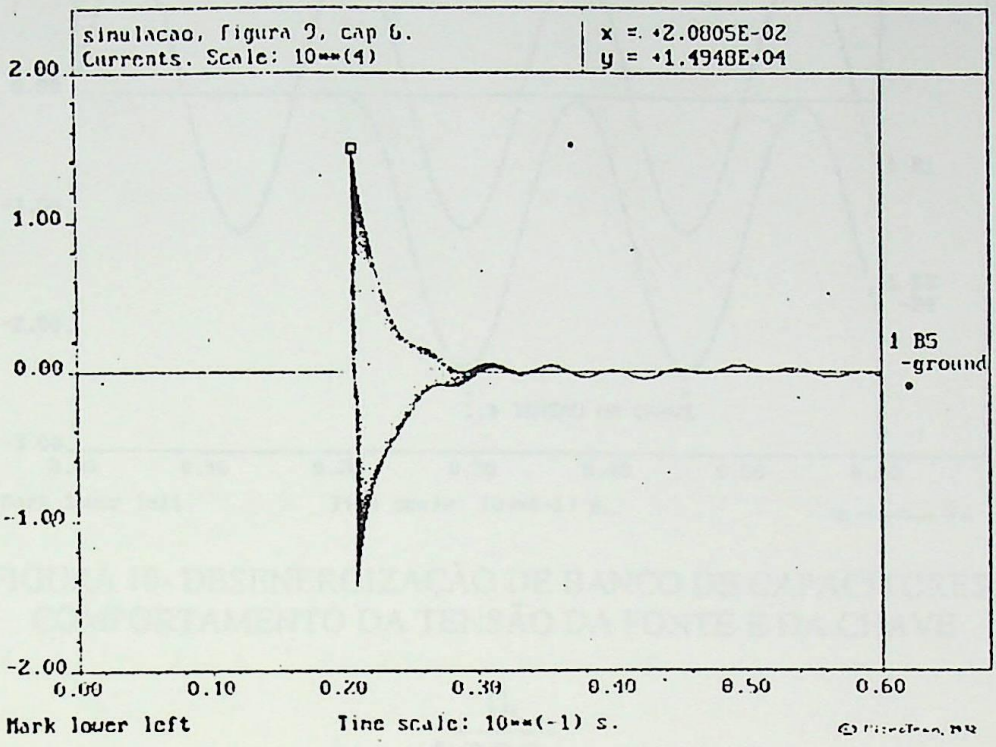


FIGURA 9- SIMULAÇÃO DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DE BANCO CAPACITORES EM PARALELO

3- TRANSITÓRIOS CAUSADOS PELA DESENERGIZAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Para o caso de desconexão de uma linha de transmissão longa ou de bancos de capacitores, estes podem apresentar condições potencialmente perigosas.

Quando um banco de capacitores é desernergizado, no caso, no valor máximo de tensão da fonte, este fica carregado com uma tensão igual a da fonte, em consequência, como a fonte é de corrente alternada, meio ciclo após a corrente se tornar nula, a tensão na chave (disjuntor) atingirá o dobro da fonte, tornando-se a tensão na chave potencialmente perigosa. A figura 10 ilustra uma simulação para o caso mencionado (ver anexo 11).

Na realidade, o problema foi bastante simplificado, já que considerou-se a tensão no capacitor de mesmo módulo que a tensão de alimentação. Isto não acontece porque a corrente que flui no capacitor faz com que o circuito apresente regulação negativa (efeito Ferranti). A figura 11 mostra o diagrama fasorial montado a partir da figura 2, omitindo-se a resistência e a chave fechada, a figura 12 ilustra uma simulação mostrando efeito Ferranti (ver anexo 11).

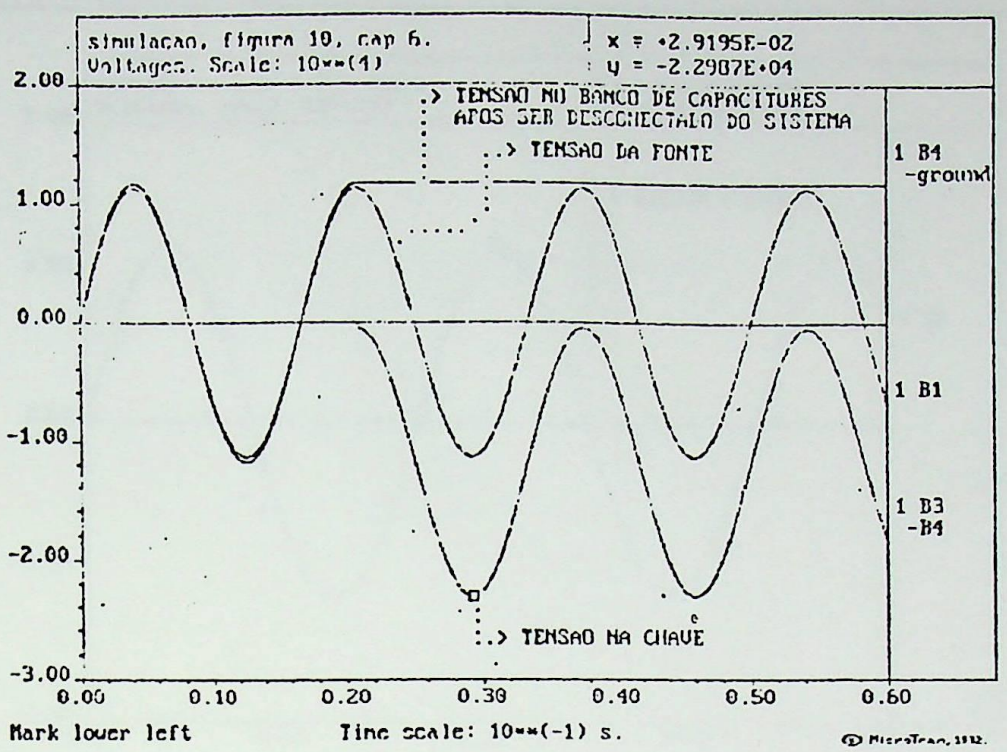


FIGURA 10- DESENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES, COMPORTAMENTO DA TENSÃO DA FONTE E DA CHAVE

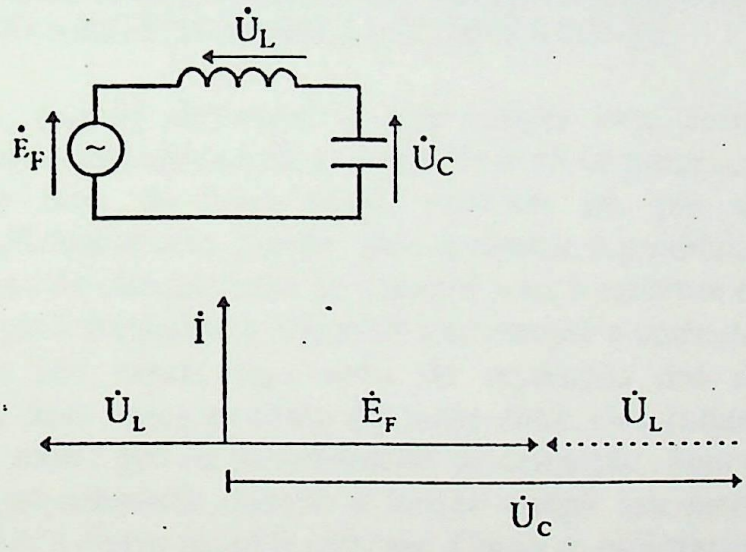


FIGURA 11- DIAGRAMA FASORIAL DE UMA CARGA CAPACITIVA

onde:

$\dot{E}_F$ - Valor eficaz da tensão na fonte;
$\dot{U}_C$ - Valor eficaz tensão no capacitor;
$\dot{U}_L$ - Valor eficaz da diferença de potencial do indutor;
$\dot{I}$ - Valor eficaz da corrente.

O efeito da regulação negativa não será levado em conta na análise seguinte, muito embora se saiba que ele existe e que pode ser importante em alguns casos.

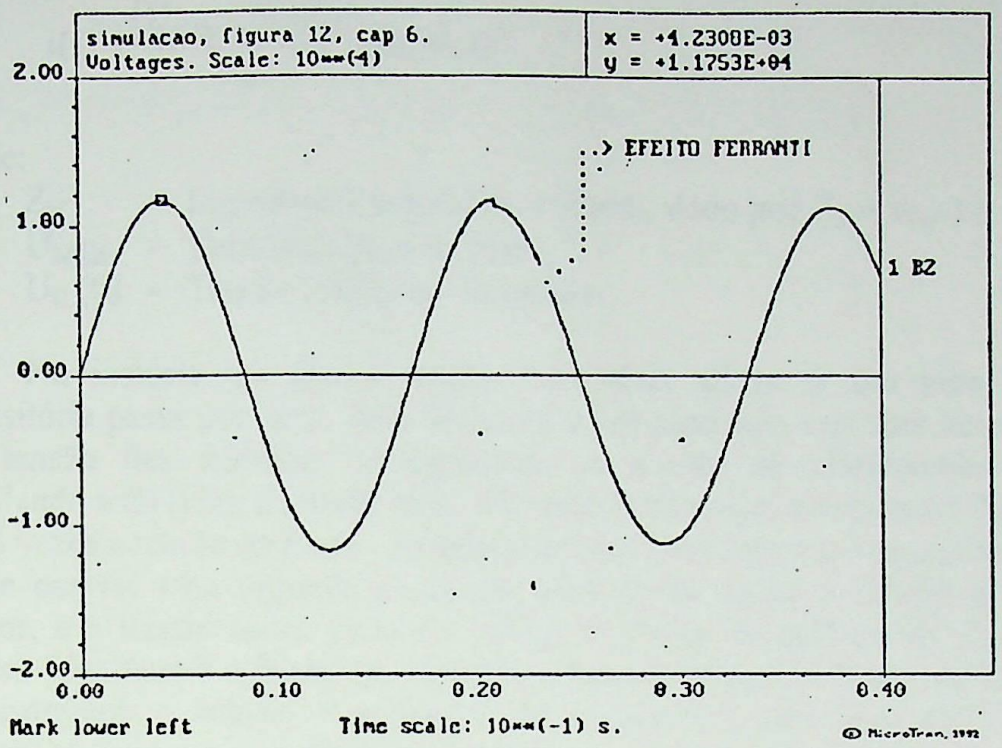


FIGURA 12- DESERNERGIZAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES, COM ISSO, MOSTRANDO A EFEITO DA REGULAÇÃO DA FONTE

Muitos disjuntores, quando chamados a interromper uma corrente de defeito, não lançam mão dos seus agentes de extinção de arco na primeira vez em que a corrente torna-se zero; ao invés disso, esperam até que se tenha estabelecido um "gap" suficientemente grande, para melhorar a possibilidade de êxito na operação. No caso de chaveamento de capacitância, a corrente em geral é pequena [1], de forma que é frequente o disjuntor interromper a corrente no seu primeiro valor zero. Se isto ocorre logo após da separação dos contatos, aparecerá uma tensão de duas vezes a tensão da fonte entre eles enquanto sua separação é pequena, de modo que há possibilidade de reignição. Suponha que aconteça uma reignição precisamente quando a tensão atingir seu pico, o que equivale a torna-se a fechar a chave naquele instante. Como se está tratando com um circuito LC, espera-se que ele responda a esta perturbação súbita através de uma oscilação à sua frequência natural.

$$f_N = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \qquad (8)$$

onde:

f_N - Frequência natural;
L - Indutância da alimentação;
C - Capacitância do sistema.

No caso, se existe energia armazenada inicialmente no banco de capacitores, a corrente na reignição será:

$$i(t) = \frac{\left(U_{MÁX} - U_C(0)\right)}{Z_N} \operatorname{sen}(w_N t) \qquad (9)$$

onde:

Z_N - Impedância natural do circuito, dado por $Z_N = w_N.L$;
$U_{MÁX}$ - Tensão de pico da fonte;
$U_C(0)$ - Tensão inicial no capacitor.

No instante em que a tensão transitória atinge o seu pico, a corrente transitória passa por zero. Se o disjuntor abrir para esta corrente zero, este valor de tensão fica mantido no capacitor. A tensão de alimentação continuará oscilando a 60 [Hz], de modo que, 1/2 ciclo mais tarde, a tensão no disjuntor será de 4 vezes a tensão da fonte. Se isto provocar uma segunda ruptura do dielétrico, pode ocorrer uma segunda descarga. Mas como agora a tensão é duas vezes maior, e a tensão agora seria de $+3U_M$ a $-5U_M$. O gráfico da figura 13 (ver anexo 13), mostra o fenômeno descrito, observa-se que toda vez que a corrente é interrompida e ocorre uma tensão de restabelecimento que faz com que o disjuntor passe a conduzir novamente, a tensão no banco de capacitores armazenado é de valor maior que na ocorrência de recondução no disjuntor nos ciclos passados, e assim a tensão vai crescendo até que danifique o capacitor ou haja uma descarga externa no disjuntor.

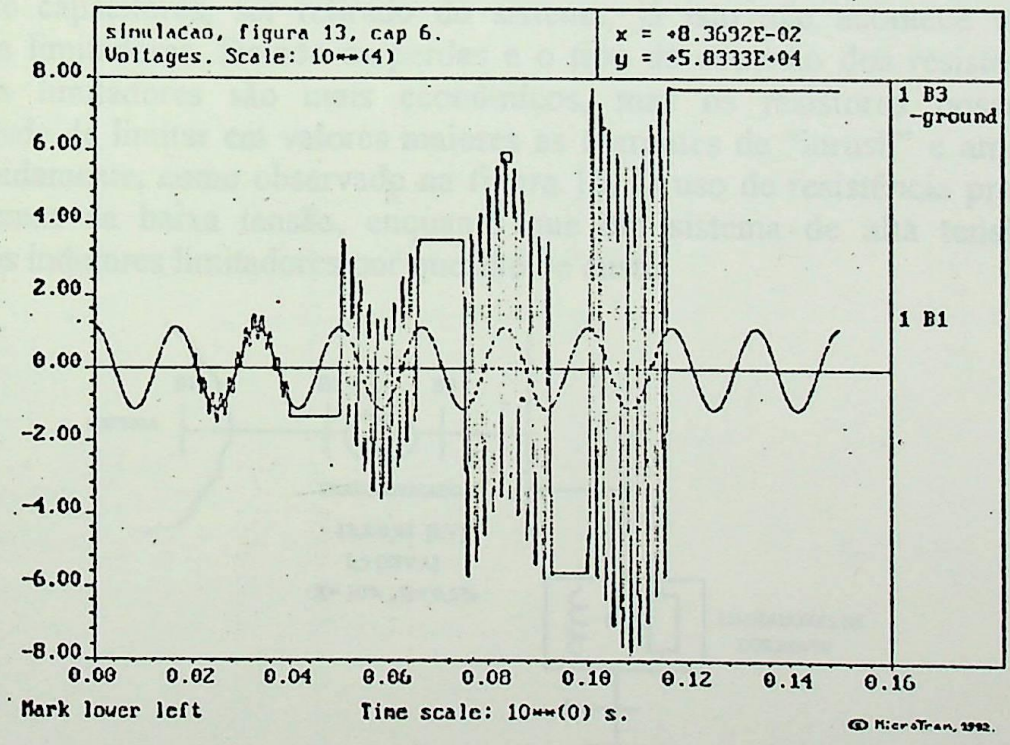


FIGURA 13- CHAVEAMENTO DE CAPACITÂNCIA COM REIGNIÇÃO NO PICO E TENSÃO.

Como a maioria dos disjuntores é construída de modo a evitar a recondução, problemas desta espécie não surgem frequentemente na desconexão de

capacitores. Mas quando ocorrem perturbações em manobras, estas podem provocar sobretensões consideráveis, por causa da sequência descrita.

4- MÉTODO DA REDUÇÃO DAS CORRENTES DE "INRUSH"

A energização de bancos de capacitores se caracteriza por apresentar correntes bastante elevadas. No caso da energização de um único banco de capacitores, o uso de limitadores de corrente como indutores ou resistores em série com o banco de capacitores não são comumente usados. Devido a presença da própria reatância do sistema, o transitório de energização normalmente não apresenta maiores consequências [1]. Todavia, existem casos onde pode ser desejável, ou necessário limitar ou reduzir o valor da corrente de "inrush", particularmente em bancos de múltiplos estágios (controlador do nível de tensão do sistema).

A figura 15 mostra uma simulação de energização de um capacitor sem limitadores de corrente, com resistência limitadora e indutor limitador. Observe que para um banco de capacitores de 60 [kVAr], os resistores limitadores de corrente são mais eficientes que os indutores limitadores. A figura 16 mostra o esquema utilizado para a simulação (ver anexo 14). Foram utilizados resistores limitadores de corrente de 0,56 [Ω] e indutores limitadores de corrente de 6 [μH] [75]. As figuras 16 e 17 mostram os esquemas utilizados para a colocação dos indutores ou resistores como limitadores da corrente "inrush" respectivamente. Os resistores como mostra o esquema da figura 17, deve após a energização do banco de capacitores, ser retirado do sistema, já isto não acontece com os indutores limitadores. Devido as perdas e o tipo de conexão dos resistores, os indutores limitadores são mais econômicos, mas os resistores possuem a propriedade de limitar em valores maiores as correntes de "inrush" e amortecer mais rapidamente, como observado na figura 15. O uso de resistência prevalece em sistemas de baixa tensão, enquanto que em sistema de alta tensão são utilizados indutores limitadores por questão de custo.

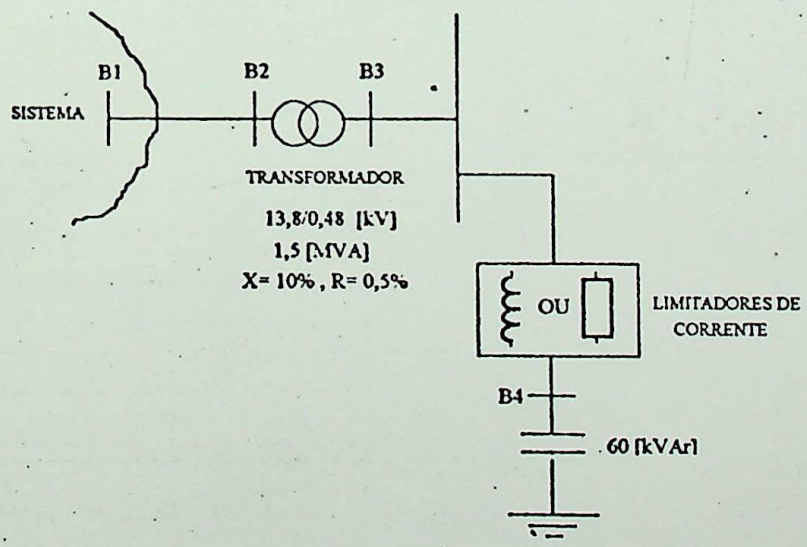


FIGURA 14- ESQUEMA UTILIZADO PARA A SIMULAÇÃO DA CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO SEM LIMITADORES E COM LIMITADORES DE CORRENTE (INDUTORES E RESISTÊNCIA)

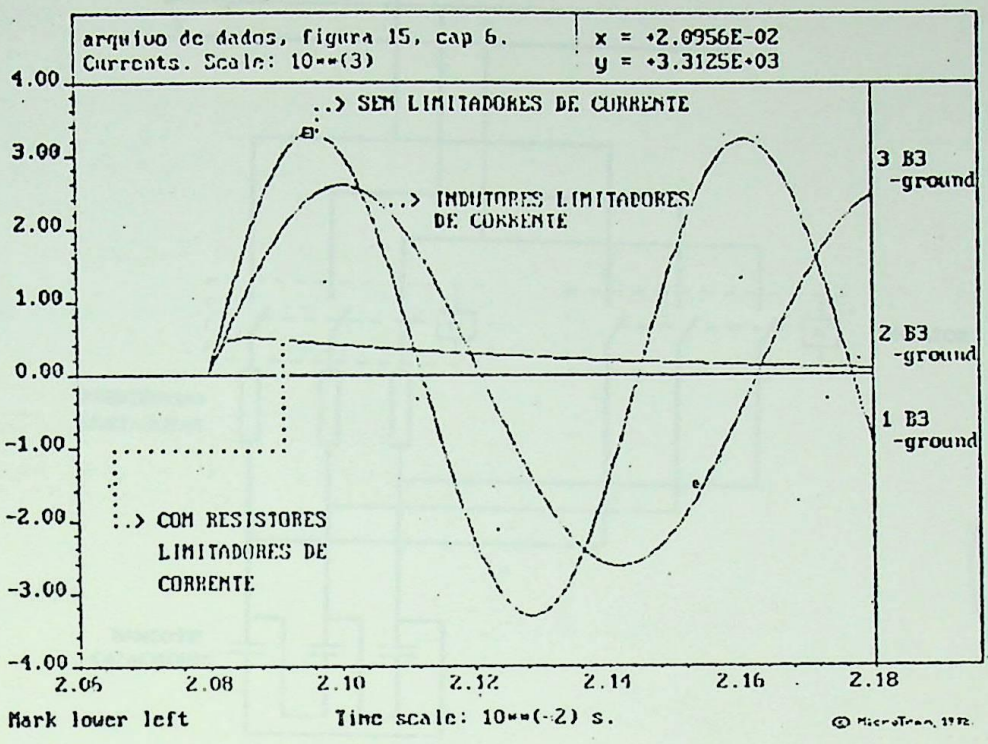


FIGURA 15- SIMULAÇÃO DE ENERGIZAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITORES UTILIZANDO-SE MÉTODOS PARA LIMITAR A CORRENTE DE "INRUSH"

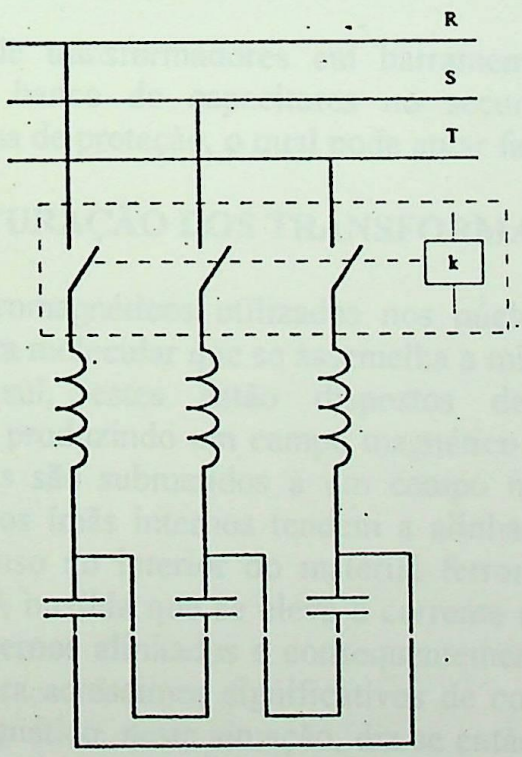
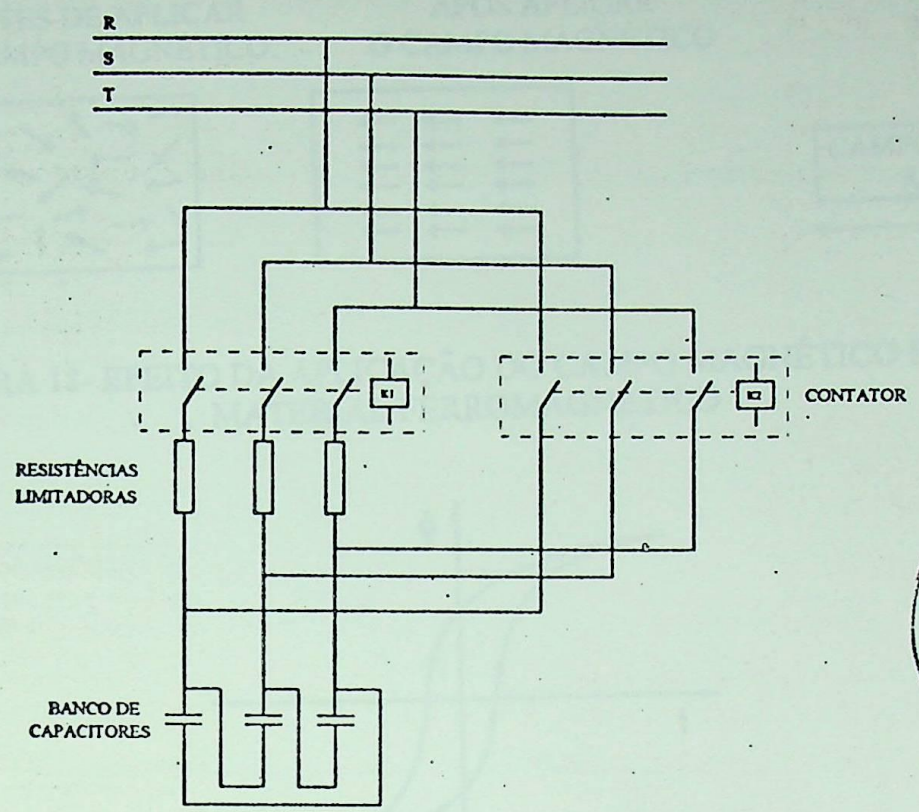


FIGURA 16- ESQUEMA UTILIZADO PARA LIMITAR A CORRENTE DE "INRUSH" ATRAVÉS DE INDUTORES



Biblioteca
MAUÁ
BIM
de Engenharia
de Itajubá - EFEI

FIGURA 17- ESQUEMA UTILIZADO PARA LIMITAR A CORRENTE DE "INRUSH" ATRAVÉS DE RESISTORES

5- ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES PRÓXIMO A BANCO DE CAPACITORES

A energização de transformadores em barramentos onde hajam outros transformadores com banco de capacitores no secundário, poderá ser um problema para o sistema de proteção, o qual pode atuar falsamente.

5.1- CURVA DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Os materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos de transformadores apresentam em estrutura molecular que se assemelha a minúsculos ímãs contendo um pólo norte e sul, estes estão dispostos de forma desordenada, consequentemente não produzindo um campo magnético resultante significativo. Quando estes materiais são submetidos a um campo magnético externo, uma bobina, por exemplo, os ímãs internos tendem a alinharem-se, produzindo um campo magnético intenso no interior do material ferromagnético, a figura 18, mostra este conceito. À medida que se eleva a corrente na bobina, maior será a quantidade de ímãs internos alinhados e consequentemente maior será o campo magnético, até que, para acréscimos significativos de corrente, obtêm-se pouco aumento do campo magnético, nesta situação, diz-se então que o material atingiu a região de saturação. A figura 19 mostra a curva normal de magnetização de um material ferromagnético, esta curva é chamada de ciclo de histerese.

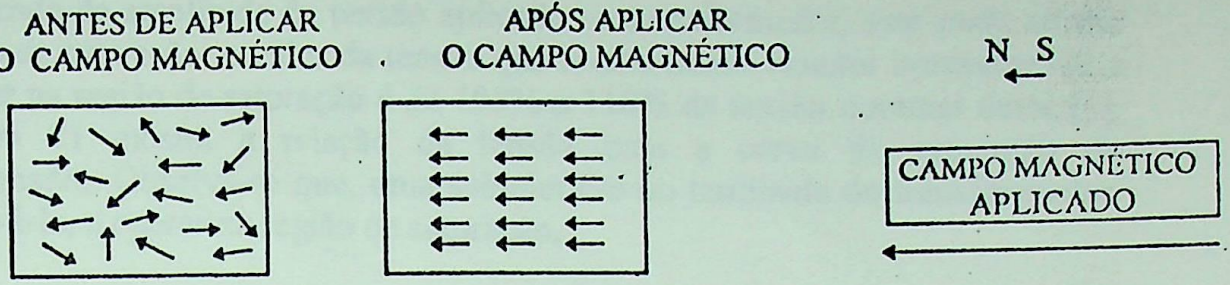


FIGURA 18- EFEITO DA APLICAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EM UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO

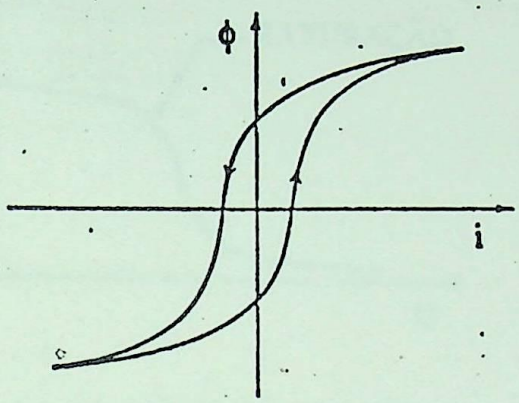


FIGURA 19- CURVA DE MAGNETIZAÇÃO PARA UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO (curva de histerese) [3]

No caso particular de um transformador o fluxo magnético que se desenvolve no seu núcleo (material ferromagnético) pode ser aproximadamente relacionado com a tensão aplicada conforme a equação 10.

$$\phi \cong \frac{U_{RMS}}{4{,}44.f.N} \qquad (10)$$

onde:

- ϕ - Fluxo magnético [V.s];
- N - Número de espiras do enrolamento do transformador (bobina);
- U_{RMS} - Tensão aplicada ao enrolamento do transformador (valor eficaz) em [V];
- f - Frequência da tensão aplicada ao enrolamento do transformador, em [Hz];

Na equação (10), observa-se que o fluxo magnético é proporcional à tensão aplicada, com isso, pode-se obter a curva de saturaçao em função da tensão e corrente aplicada ao enrolamento do transformador.

À medida que a tensão varia de magnitude, a reatância de magnetização também varia, reduzindo-se de valor, à medida que o fluxo no núcleo do enrolamento do transformador entra na região de saturação. A figura 20, mostra a variação da reatância de magnetização em função da tensão aplicada. Logo

dependendo da amplitude da tensão aplicada ao transformador, este pode atingir a região de saturação, o valor da tensão que leva o transformador normalmente a trabalhar na região de saturação é de 105% a 110% da tensão nominal deste [1]. A figura 21 mostra a relação da tensão com a curva de saturação do transformador. Observa-se que, uma sobretensão no terminais do transformador, pode levá-lo, a operar na região de saturação.

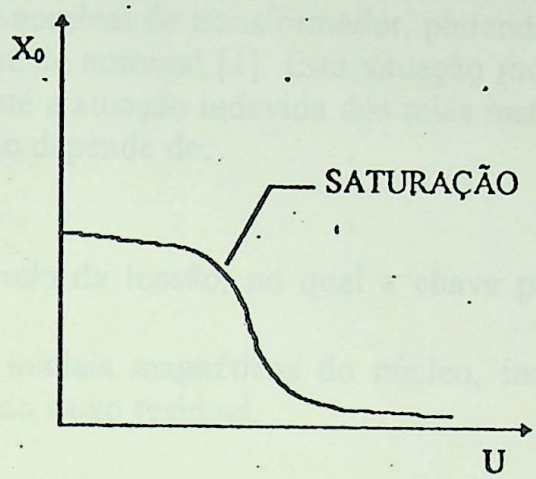


FIGURA 20- VARIAÇÃO DA REATÂNCIA MAGNÉTICA DE UMA BOBINA EM FUNÇÃO DA TENSÃO [83]

OBSERVAÇÃO: Para fins de análise a curva de saturação da figura 19, pode ser representada por duas retas (figura 21-b) com um daterminado grau de inclinação, uma determina a região não saturada e a outra a região saturada.

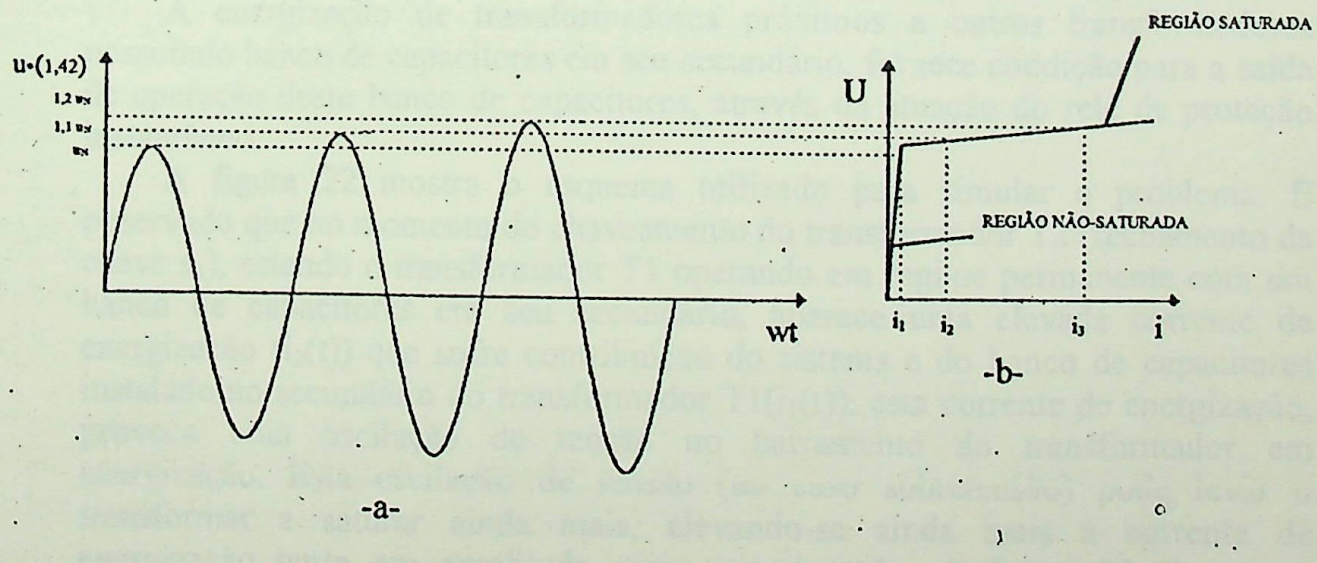


FIGURA 21- RELAÇÃO DA TENSÃO APLICADA COM A CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR

5.2- CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR ("INRUSH")

Os transformadores de potência são projetados de modo que a corrente necessária para manter, em regime permanente, a sua magnetização sob operação normal, é uma pequena fração da corrente nominal, porém no período transitório (energização), entre o instante da aplicação de tensão ao transformador e o estabelecimento, eventual, de uma condição de regime permanente, a corrente atinge um valor de pico inicial denominado de corrente de "inrush" que é várias vezes o da corrente nominal do transformador, podendo atingir valores entre 10 a 14 vezes a sua corrente nominal [1]. Esta situação momentânea, pode ocasionar queda de tensão e até a atuação indevida dos relés instantâneos. O valor atingido de regime transitório depende de:

- Ponto do ciclo da tensão, no qual a chave para o energizamento seria fechada;
- Condições iniciais magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e a polaridade do fluxo residual.

Vale salientar que, caso o sistema de alimentação do transformador esteja operando com níveis de tensão acima dos nominais do transformador, o valor da corrente de "inrush" será ainda maior que em condições nominais, devido a condição de sobretensão levar o transformador ainda mais para a região de saturação (ver figura 21).

5.3- ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES PRÓXIMOS A BANCO DE CAPACITORES

A energização de transformadores próximos a outros transformadores possuindo banco de capacitores em seu secundário, fornece condição para a saída de operação deste banco de capacitores, através da atuação do relé de proteção instantâneo.

A figura 22 mostra o esquema utilizado para simular o problema. É observado que no momento do chaveamento do transformador T2 (fechamento da chave s_1), estando o transformador T1 operando em regime permanente com um banco de capacitores em seu secundário, aparece uma elevada corrente de energização ($i_2(t)$) que sofre contribuição do sistema e do banco de capacitores instalado no secundário do transformador T1($i_1(t)$), esta corrente de energização, provoca uma oscilação de tensão no barramento do transformador em energização. Esta oscilação de tensão (no caso sobretensão) pode levar o transformar a saturar ainda mais, elevando-se ainda mais a corrente de energização tanto em amplitude como em duração. A figura 23 ilustra os resultados obtidos pelo sistema da figura 22. Com isto, a contribuição de corrente ($i_1(t)$) a partir do banco de capacitores para a energização do

transformador T1, torna-se elevada, fazendo com que possa ocorrer a saída de operação do seu banco de capacitores, devido a atuação do sistema de proteção.

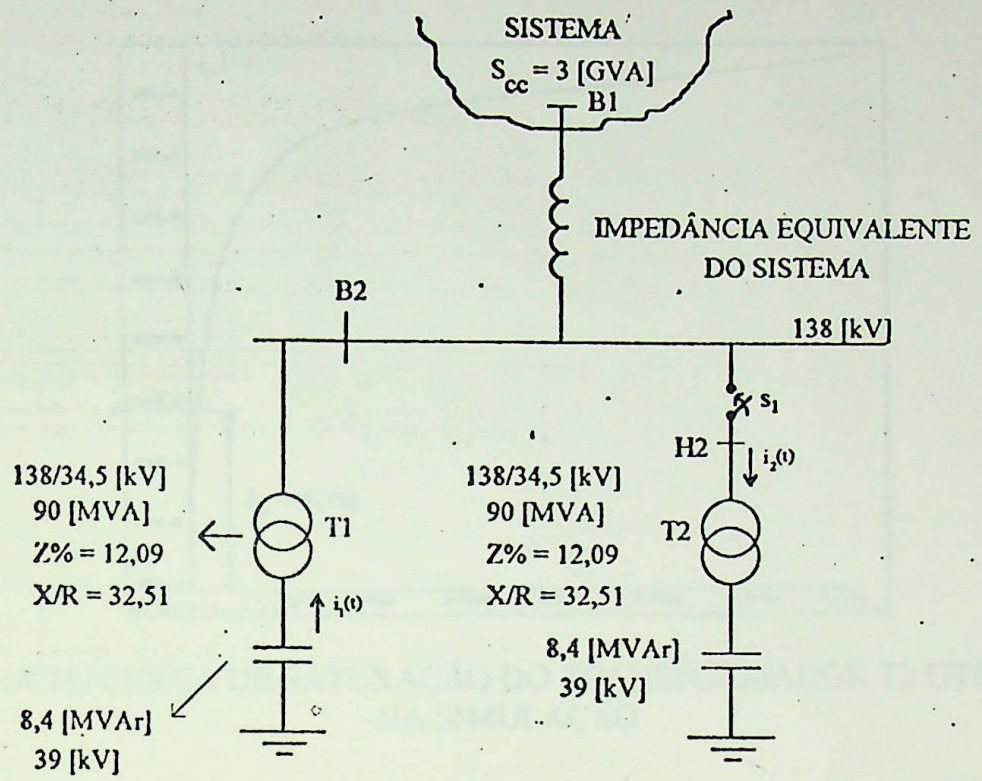


FIGURA 22- ESQUEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

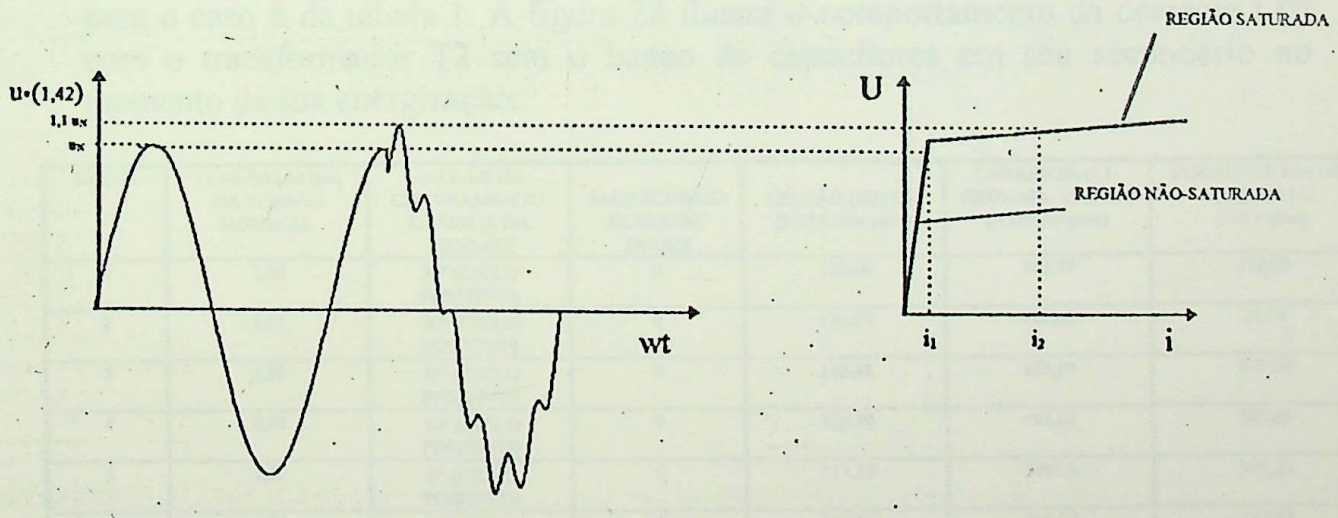


FIGURA 23- COMPORTAMENTO DA TENSÃO NA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR T2, EVIDENCIANDO O PROBLEMA DA TENSÃO COM A CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR PARA O CASO SIMULADO DA FIGURA 25

Serão simulados várias situações que envolvem o fenômeno, tais como, variação da tensão da fonte, magnetismo residual do transformador T2 e ângulo do ciclo da tensão da fonte, magnetismo residual do transformador T2. Estas situações tem por objetivo observar a oscilação de tensão na barra onde está

situado o transformador em energização e a corrente que atravessa o banco de capacitores, bem como a corrente de energização do transformador T2.

A figura 24 mostra a curva se saturação do transformador T2, utilizado na simulação.

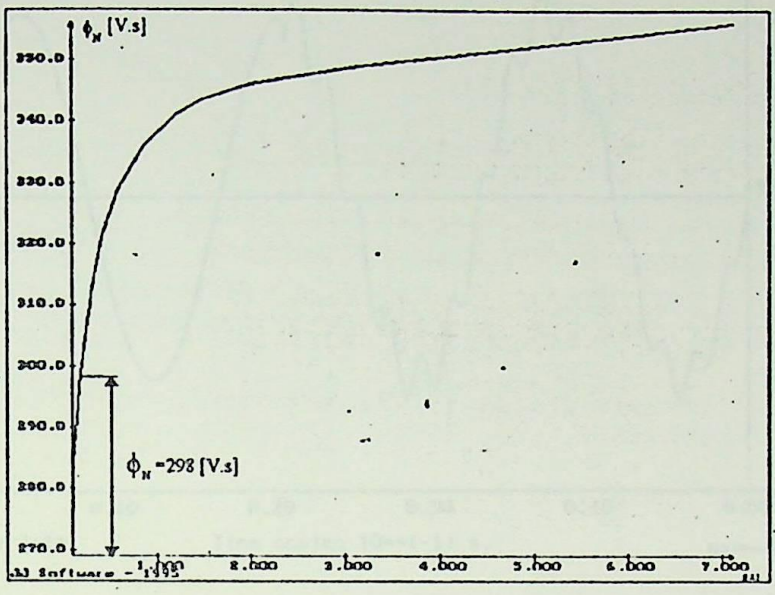


FIGURA 24- CURVA DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR T2 UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

A tabela 1 mostra o resumo dos casos simulados, as figuras 25, 26 e 27 mostram a tensão no barramento B2, a corrente no banco de capacitores do transformador T1 ($i_1(t)$) e a corrente no transformador T2 ($i_2(t)$) respectivamente, para o caso 8 da tabela 1. A figura 28 ilustra o comportamento da corrente $i_1(t)$ com o transformador T2 sem o banco de capacitores em seu secundário no momento de sua energização.

CASOS	TENSÃO EM [pu] DA TENSÃO NOMINAL	ÂNGULO DE CHAVEAMENTO DA ONDA DA TENSÃO	MAGNETISMO RESIDUAL (inicial)	TENSÃO (B2) EM [kV] (valor pico)	CORRENTE (L1-GROUND - $i_1(t)$) EM [A] (valor pico)	CORRENTE EM H2 - $i_2(t)$) EM [A] (valor pico)
1	1,00	30° (CICLO POSITIVO)	0	120,06	753,77	231,93
2	1,05	30° (CICLO POSITIVO)	0	126,89	782,06	21,73
3	1,10	30° (CICLO POSITIVO)	0	116,48	835,80	278,60
4	0,95	30° (CICLO POSITIVO)	0	126,79	683,06	200,81
5	1,00	0° (CICLO POSITIVO)	0	113,39	1493,4	359,21
6	1,00	90° (CICLO POSITIVO)	0	132,89	209,30	132,93
7	1,05	90° (CICLO POSITIVO)	0	133,99	1566,90	379,00
8	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	0	136,99	1609,37	398,80
9	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	i=0,09 [A] Φ=284 [V.S]	136,99	1627,75	398,80
10	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	i=0,168 [A] Φ=299 [V.S]	136,99	1648,97	398,80
11	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	i=0,298 [A] Φ=313 [V.S]	136,99	1658,87	398,80

TABELA 1- RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

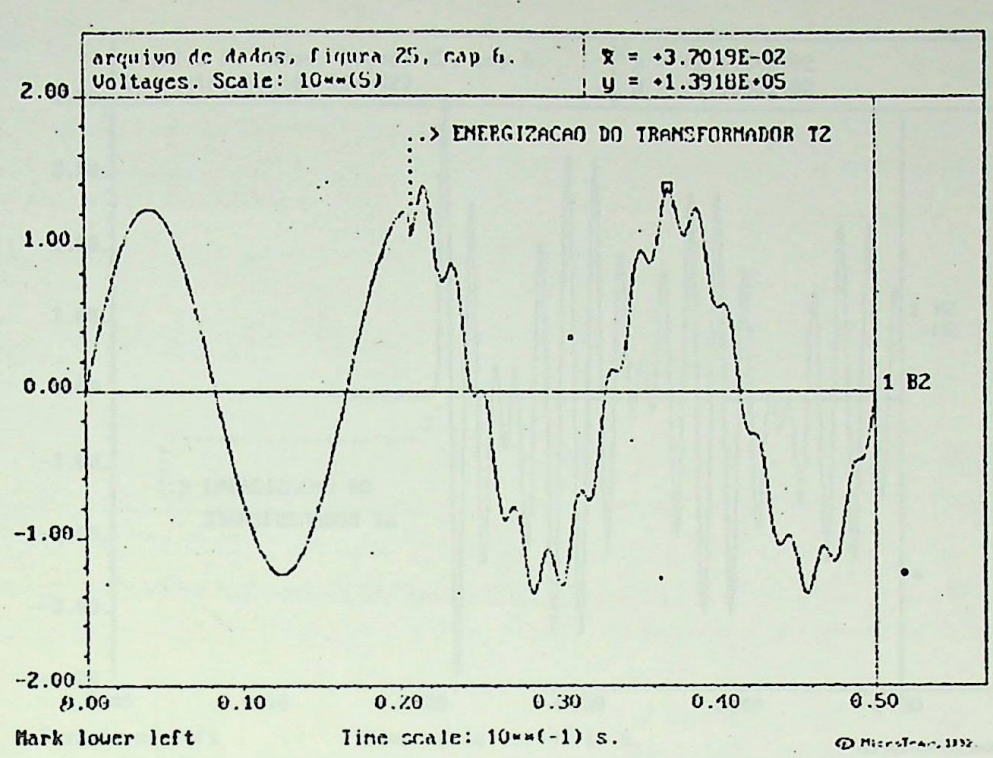


FIGURA 25- SIMULAÇÃO DO ESQUEMA DA FIGURA 22, MOSTRANDO A TENSÃO NA BARRA B2, PARA O CASO 8 DA TABELA 1

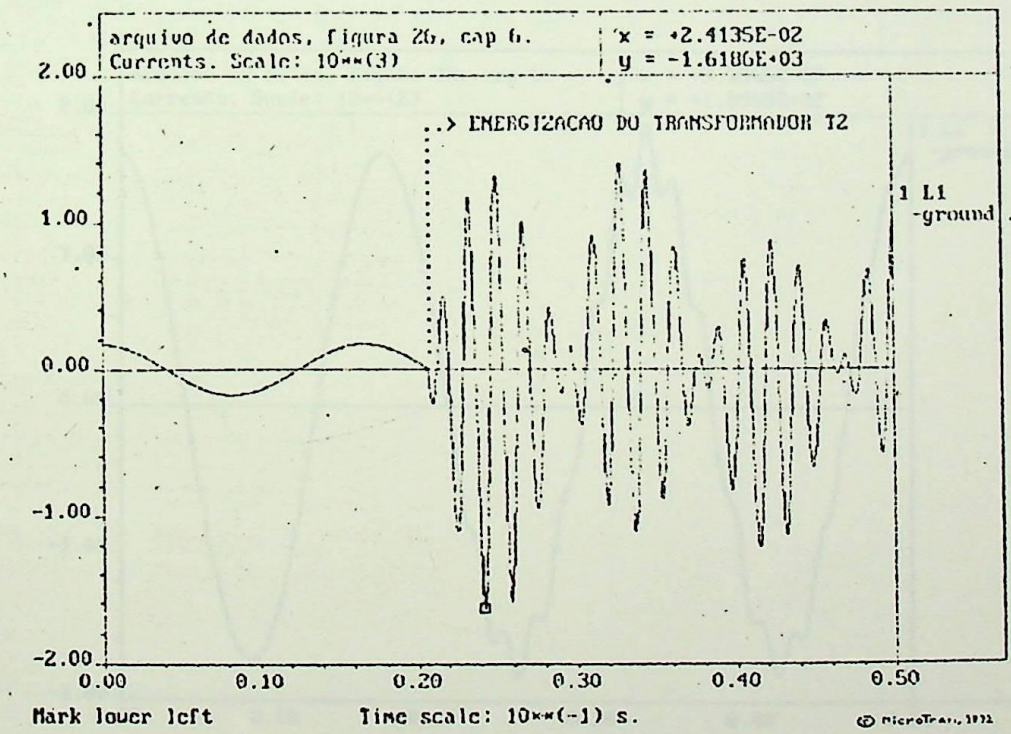


FIGURA 26- SIMULAÇÃO DO ESQUEMA DA FIGURA 22, MOSTRANDO A CORRENTE NA BARRA L1-GROUND (BANCO DE CAPACITORES), PARA O CASO 8 DA TABELA 1

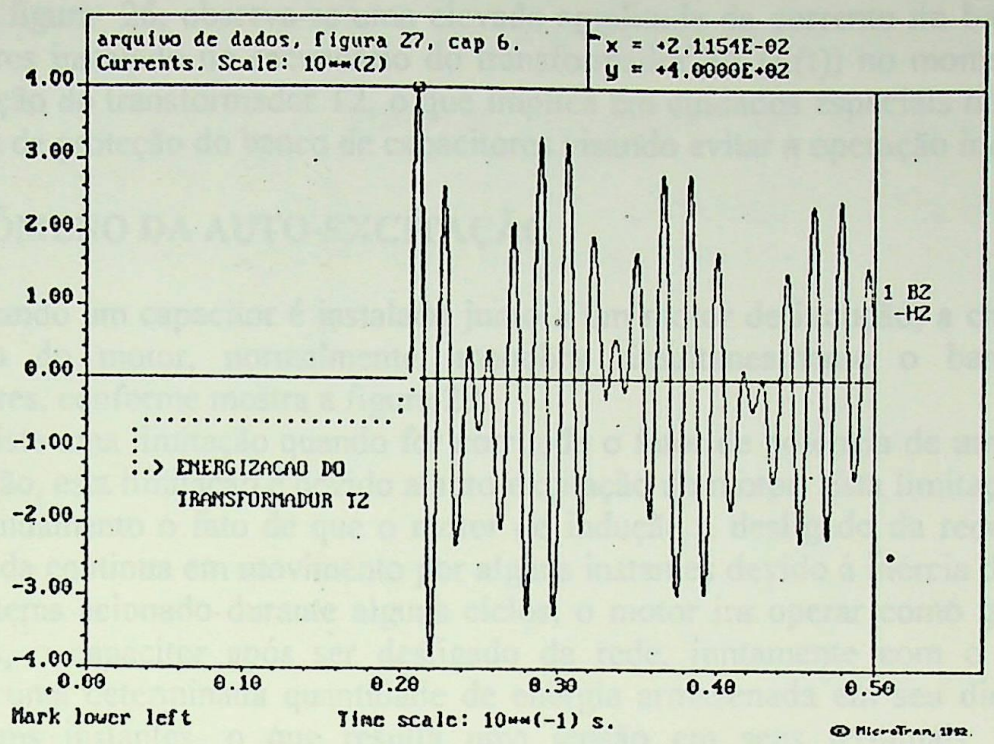


FIGURA 27- SIMULAÇÃO DO ESQUEMA DA FIGURA 22, MOSTRANDO A CORRENTE NA BARRA B2-H2 (BANCO DE CAPACITORES), PARA O CASO 8 DA TABELA 1

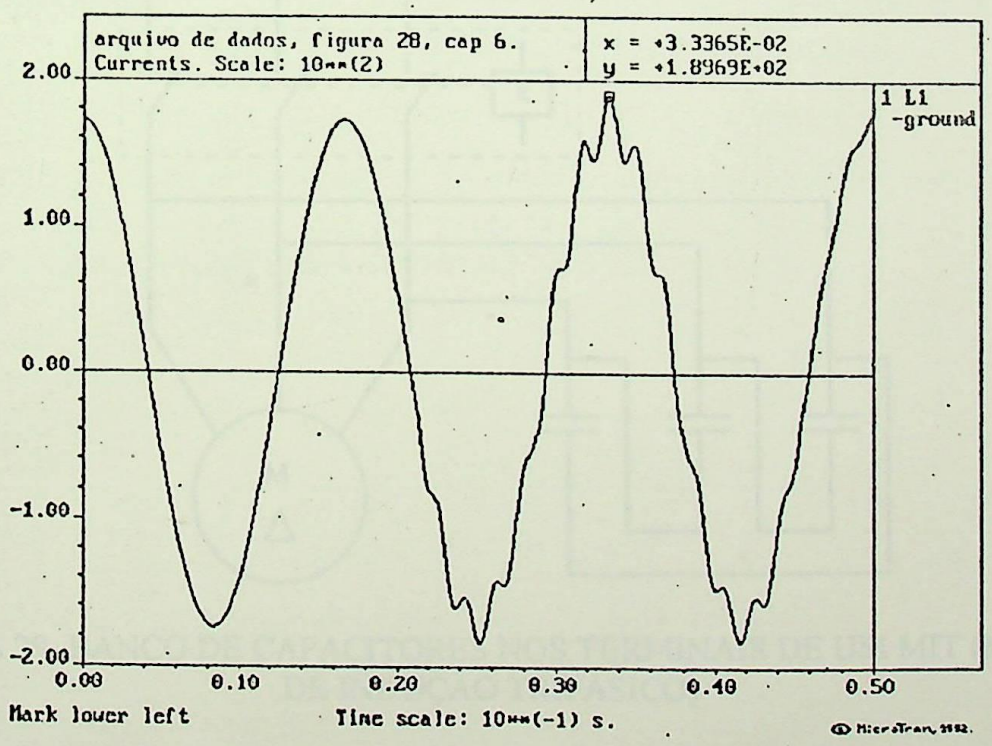


FIGURA 28- SIMULAÇÃO DO ESQUEMA DA FIGURA 22, MOSTRANDO A CORRENTE NA BARRA L1-GROUND (BANCO DE CAPACITORES) SEM O BANCO DE CAPACITORES NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR T2, PARA O CASO 8 DA TABELA 1

Na figura 26, observa-se uma elevada amplitude da corrente no banco de capacitores instalado no secundário do transformador T1 ($i_1(t)$) no momento da energização do transformador T2, o que implica em cuidados especiais no ajuste dos relés de proteção do banco de capacitores visando evitar a operação indevida.

6- FENÔMENO DA AUTO-EXCITAÇÃO

Quando um capacitor é instalado junto a um motor de indução, a chave de comando do motor, normalmente, manobra simultaneamente o banco de capacitores, conforme mostra a figura 29.

Existe uma limitação quando for corrigido o fator de potência de um motor de indução, esta limitação é devido a auto-excitação do motor. Esta limitação tem como fundamento o fato de que o motor de indução é desligado da rede e seu rotor ainda continua em movimento por alguns instantes devido à inércia do rotor e do sistema acionado durante alguns ciclos, o motor ira operar como gerador. Ademais, o capacitor após ser desligado da rede, juntamente com o motor, mantém uma determinada quantidade de energia armazenada em seu dielétrico por alguns instantes, o que resulta uma tensão em seus terminais. Nestas condições, pode ocorrer ressonância entre os efeitos indutivo que ocorre no motor e o banco de capacitores.

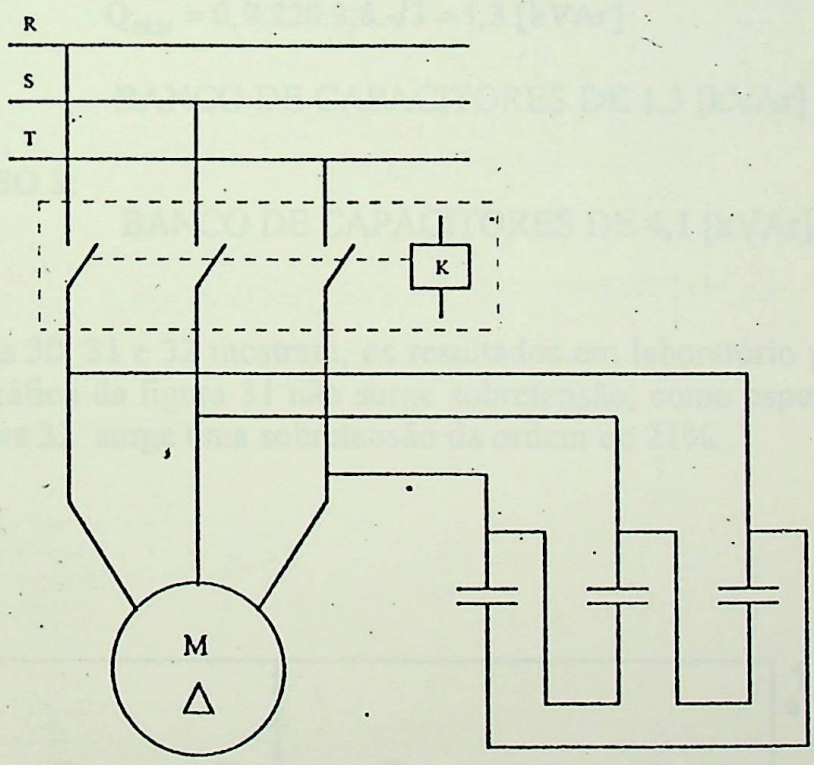


FIGURA 29- BANCO DE CAPACITORES NOS TERMINAIS DE UM MIT (MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO)

Para mostra este fato, utiliza-se o esquema da figura 29, e realizaram-se ensaios em laboratório para os seguintes casos:

1 - Verificação da tensão nos terminais do motor sem banco de capacitores;
2 - Utilizando-se a limitação dos bancos de capacitores em $Q_{BCN} = 0,9.220.3,8.\sqrt{3} = 1,3$ [kVAr];
3 - Utilizando-se um banco de capacitores de potência acima do valor calculado no item 2, deverá surgir sobretensões.

DADOS:

MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO:

$U_N = 220$ [V]
$I_N = 9$ [A]
$P_N = 2,24$ [kW]
$FP = 0,8$
$n_N = 1680$ [rpm]
$R_{END} = 0,92$
$I_0 = 3,8$ [A]

CASO 1: SEM BANCO DE CAPACITORES

CASO 2:

$$Q_{BCN} = 0,9.220.3,8.\sqrt{3} = 1,3 \text{ [kVAr]}$$

BANCO DE CAPACITORES DE 1,3 [kVAr]

CASO 3:

BANCO DE CAPACITORES DE 4,1 [kVAr]

As figuras 30, 31 e 32 mostram, os resultados em laboratório para os casos 1, 2 e 3. No gráfico da figura 31 não surge sobretensão, como esperado, mas no gráfico da figura 32 surge uma sobretensão da ordem de 21%.

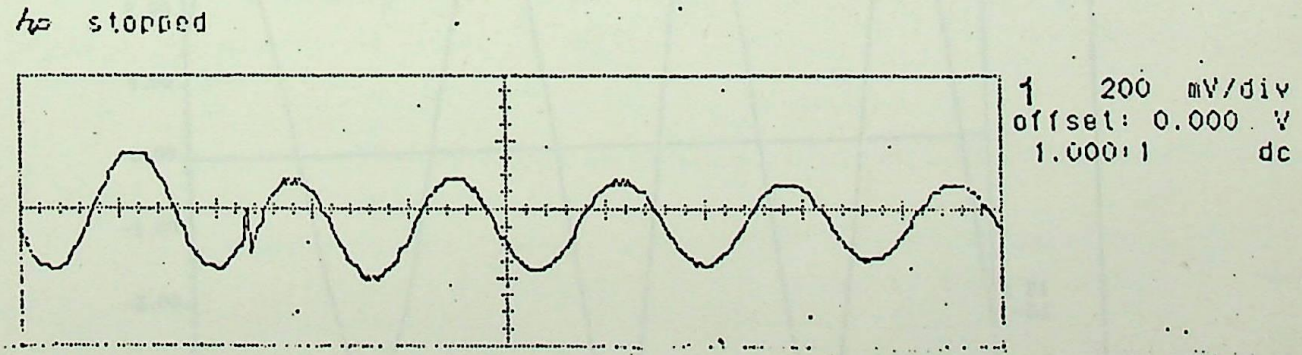


FIGURA 30- ONDA DE TENSÃO PARA O CASO 1, SEM BANCO DE CAPACITORES

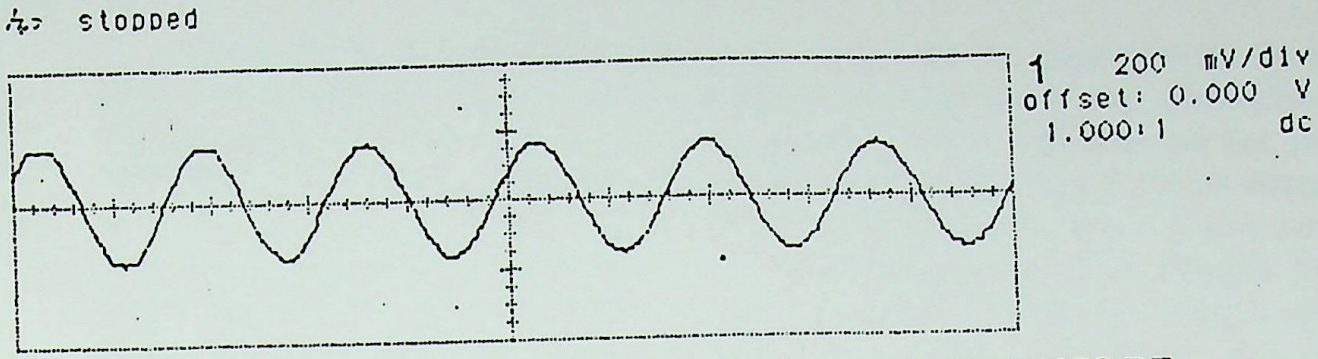


FIGURA 31- ONDA DE TENSÃO PARA O CASO 2, COM BANCO DE CAPACITORES DE 1,3 [kVAr] (TRIFÁSICO)

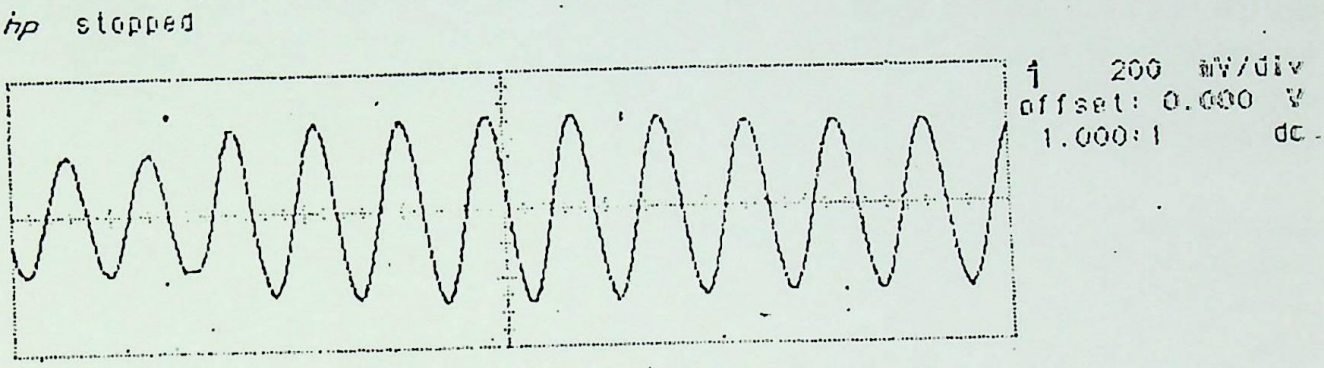


FIGURA 32- ONDA DE TENSÃO PARA O CASO 3, COM BANCO DE CAPACITORES DE 4,1 [kVAr] (TRIFÁSICO)

Utilizando-se um simulador, tem-se para o caso 3 na figura 33, uma simulação mostrando a sobretensão em torno de 21% (ver anexo 15).

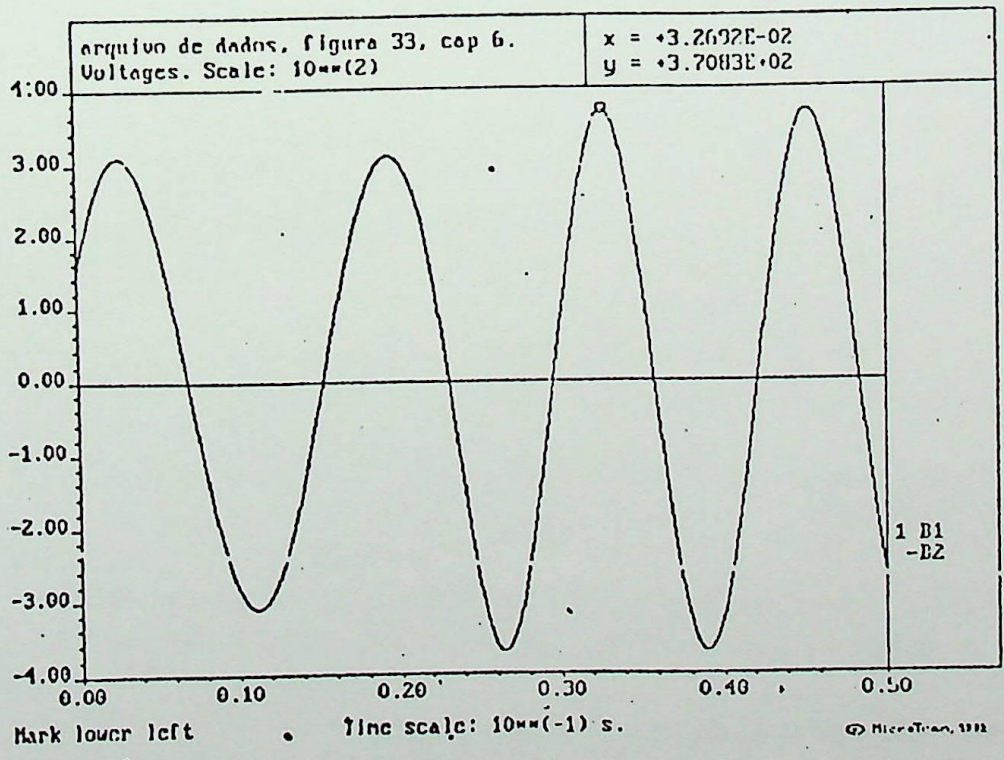


FIGURA 33- SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DA AUTO-EXCITAÇÃO

7- EQUIPAMENTOS DE MANOBRA DE BANCOS DE CAPACITORES

Como foi observado anteriormente, no momento do chaveamento de um banco de capacitores, este se apresenta para o sistema como uma condição de curto-circuito, absorvendo uma corrente elevada, que é limitada apenas pela impedância da rede. Já o desligamento de banco de capacitores é menos severo, pois este não procura manter a corrente que absorve, como acontece com a carga indutiva, o problema é que o capacitor quando desconectado do sistema pela chave (disjuntor), retém uma tensão em seus terminais (tensão da fonte) e meio ciclo após a sua desconexão a tensão nos terminais da chave (disjuntor) é o dobro da tensão da rede, nessas condições, pode resultar numa corrente de reignição do arco.

Desta forma, os contatos das chaves de manobra, ao ligar um capacitor ou banco, são extremamente solicitados pela corrente inicial, devendo-se dimensionar estas chaves observando-se sua capacidade máxima de corrente. O fechamento dos contatos das chaves, devem ser o mais simultâneo possível, para se evitar a formação de arco, que evidentemente provoca a redução de vida dos contatos.

Conforme [22], os equipamentos de manobra devem ser projetados para suportar permanentemente uma corrente a 1,3 vezes a corrente nominal dada para uma tensão senoidal de valor eficaz igual à tensão nominal, na frequência nominal. Como o capacitor pode ter variação na capacitância de até 1,1 vezes a capacitância nominal, esta corrente pode ter um valor de até 1,43 vezes a corrente nominal.

7.1- BANCOS EM BAIXA TENSÃO (menor que 1000 [V])

Os bancos de capacitores em baixa tensão podem ser manobrados basicamente através dos seguintes equipamentos.

a - Contatores;
b - Chave secionadora;
c - Disjuntores termomagnéticos.

a- *contatores*

Os contatores são dispositivos de atuação magnética destinado à interrupção de um circuito em carga ou a vazio.

Os contatores são normalmente usados quando se deseja manobrar o banco de capacitores a distância ou quando se deseja manobrar diversas seções de um banco de capacitores automático.

Uma das principais características dos contatores é o elevadíssimo número de operações que eles podem efetuar, sem que seja exigida a revisão ou substituição das partes mecânicas.

Conforme [46], os contatores devem ser projetados com uma corrente nominal mínima dada pela equação 12:

$$I_{CO} = 1{,}35.I_C \qquad (12)$$

b- *Chave secionadora;*

A principal função dos seccionadores, é permitir que seja feita uma manutenção segura em uma determinada parte do sistema.

Estes seccionadores são providos de câmaras de extinção de arco e de um conjunto de molas capazes de imprimir uma velocidade elevada de atuação dos contatos. Apresentam o inconveniente de se exigir uma manutenção mais cuidadosa, sendo necessário substituir as câmaras de extinção após um certo números de operações.

Segundo [46], Chave secionadora, deve ser dimensionada para uma corrente nominal mínima dada pela equação (13).

$$I_{CH} = 1{,}65.I_C \qquad (13)$$

c- *Disjuntores termomagnéticos*

É um equipamento de comando e proteção de circuitos de baixa tensão, cuja finalidade é operar em condições de carga e interromper correntes de sobrecarga e curto-circuito.

Os disjuntores termomagnéticos são dotados de disparadores térmicos e eletromagnéticos. Os disjuntores de baixa tensão tem uma alta capacidade de corrente de interrupção, podendo alcançar 90 [kA] [78].

Segundo [6], A corrente de ajuste da unidade térmica do disjuntor deve ser dada pela a equação (14).

$$I_{AJ} = 1{,}35.I_C \qquad (14)$$

onde:

I_C - Corrente do banco de capacitores;
I_{CH} - Corrente mínima da chave, em [A];
I_{CO} - Corrente mínima do contator, em [A];
I_{AJ} - Corrente de ajuste da unidade térmica em [A].

Vale salientar que se o motor é acionado através de uma chave estrela-triângulo, o banco de capacitores, deve permanecer ligado ao motor durante a manobra de comutação da chave, isto é, da posição estrela para a posição final em triângulo.

7.2- BANCO DE CAPACITORES EM MÉDIA E ALTA TENSÃO

Em média e alta tensão os bancos de capacitores são chaveados normalmente por disjuntores.

Os disjuntores são chaves ou dispositivos de manobra com capacidade suficiente para fazer frente às solicitações que ocorrem quando do estabelecimento ou desligamento de equipamentos ou partes da instalação em estado normal de funcionamento ou não e, em especial sobre condições de curto-circuito. Os disjuntores normalmente usados são:

a- Disjuntores a óleo

Os disjuntores a óleo podem ser caracterizados de acordo com seu volume de óleo, ou seja, os disjuntores de grande volume de óleo (GVO) e disjuntores de pequeno volume de óleo (PVO).

Nos disjuntores a óleo, o processo de extinção do arco ocorre da seguinte forma: quando da separação dos contatos, há uma formação de arco entre os contatos, logo circundado pelo óleo existente na região dos pólos. Como o arco elétrico apresenta uma temperatura excessivamente elevada, as primeiras camadas de óleo que tocam o arco são decompostas e gaseificadas, resultando na liberação de certa quantidade de gases, compostos em sua maioria por hidrogênio, associado a uma percentagem de acetileno e metano. A tendência dos gases é elevar-se para a superfície do óleo; nesta trajetória leva consigo o próprio arco, que se alonga e resfria ainda nas imediações dos contatos, extinguindo-se, normalmente logo na primeira passagem da corrente pelo zero natural.

Nos sistemas de média tensão e para aplicação geral e, subestações consumidoras de pequeno e médio porte, os disjuntores a óleo têm praticamente dominado o mercado, devido ao seu baixo custo, robustez de construção, simplicidade operativa e reduzidas exigências de manutenção, dadas as características de operação destes sistemas [74], até o início da década de 90, após isso, os disjuntores a SF_6 vem se tornando mais utilizados.

b- Disjuntores a SF_6 (HEXAFLUORETO DE ENXOFRE)

Os disjuntores que utilizam como meio extintor do arco o hexafluoreto de enxofre (SF_6) o qual é um gás com resistência dielétrica igual a 2,5 a do ar, à pressão atmosférica. Esta alta rigidez dielétrica permite que pequenas aberturas entre os contatos suportem altas tensões de restabelecimento. Os disjuntores a SF_6 são essencialmente isentos de reignição de arco, sendo que na rara eventualidade de uma reignição, o gás absorve o efeito "explosivo" gerado pelo surto de corrente, praticamente eliminando a possibilidade de danos ao disjuntor.

O princípio básico de interrupção em SF_6 se fundamenta em sua capacidade de levar rapidamente a zero a condutibilidade elétrica do arco, absorvendo os elétrons livres nas região do mesmo, e restabelecer com extrema velocidade a sua rigidez dielétrica após cessados os fenômenos que motivaram a formação do arco. Isto porque o SF_6 é um gás eletronegativo, o que lhe propicia facilidades de

capturar elétrons livres presentes no plasma de um arco elétrico, reduzindo, portanto, a sua condutividade à medida que a corrente tende ao seu zero natural.

Por ser um gás extremamente pesado e incolor deve-se tomar cuidado ao manipulá-lo em ambientes fechados, pois, caso haja vazamento, o SF_6 se acumula em regiões inferiores do ambiente, substituindo o ar e provocando asfixia quando atingir um determinado nível.

Uma propriedade interessante do SF_6 é a de que sua rigidez dielétrica não é seriamente afetada quando se mistura com o ar em proporções não superiores a 1/5 [3].

À medida que se pressiona o SF_6 a sua rigidez dielétrica aumenta substancialmente. Para cerca de 2 [kg/ cm^2], a sua rigidez dielétrica é a mesma do óleo mineral de boa qualidade. Para se prever da perda de pressão, os disjuntores são providos de sistema de sinalização e intertravamento.

c- Disjuntores a seco

São assim denominados os disjuntores que utilizam o princípio da força eletromagnética para conduzir o arco elétrico a uma câmara de extinção, onde o arco é dividido, seccionado e finalmente extinto. Neste tipo de disjuntor a interrupção é feita em câmara de ar a pressão natural. O arco a ser conduzido para o interior da câmara sofre um processo de alongamento que faz aumentar sensivelmente a sua resistência elétrica e, consequentemente, a tensão do arco. Ao penetrar o interior da câmara é seccionado por um sistema de placas paralelas, ao mesmo tempo em que é resfriado ao contato com as paredes da câmara mencionada.

Os disjuntores a sopro magnético estão sujeitos a uma operação desfavorável quando a corrente a ser interrompida é de pequeno valor, cerca de 150 [A] [3] ou menor. Nesta condição o campo magnético, impulsionador do arco para o interior da câmara, é muito fraco devido ao baixo valor da corrente elétrica. Com isso o tempo de extinção do arco é muito longo, ocasionando um aquecimento exagerado na câmara de extinção.

Estes tipos de disjuntores não devem ser utilizados em locais sujeitos a umidade elevada, salinização, poeira ou partículas em suspensão em quantidades anormais [3]. Também estão sujeitos a operarem com reignição de arco, quando de manobras em bancos de capacitores [1], este tipos de disjuntores são de tecnologia superada.

d- Interruptores a vácuo

A interrupção a vácuo consiste na abertura dos contatos do interruptor no interior de uma ampola onde se faz um elevado nível de vácuo e é onde considerada a condição de vácuo, quando a pressão atinge 10^{-8} [torr], que corresponde a uma pressão negativa de $1{,}3595 \cdot 10^{-7}$ [kg/m^2], ou seja, 1 [torr] equivale a 1 [mm] de coluna de mercúrio, ou, 13,595 [kg/m^2].

Os interruptores a vácuo são apropriados a manobra de banco de capacitores, pois interrompem sem dificuldade qualquer corrente, desde as mais baixas, até a máxima nominal. Os contatos possuem grande durabilidade devido à

pequena erosão que sofrem. Os espaços entre os contatos recobra a rigidez dielétrica em tempos extremamente curtos, evitando-se sobretensões transitórias de restabelecimento.

Em certas condições de serviço os interruptores a vácuo, apresentam algumas peculiaridades. Pode ocorrer, por exemplo, o corte da corrente durante a fase de abertura antes que o mesmo atinja o valor zero. Este corte de corrente prematuro ocasiona oscilações e sobretensões nas cargas indutivas ligadas à linha de alimentação. Outra possibilidade é de, durante o fechamento, ocorrer uma pré-ignição seguida de interrupção momentânea das correntes transitórias de energização, antes do completo fechamento dos contatos, devido a uma possível velocidade insuficiente de aproximações dos contatos. Isto pode ocasionar o armazenamento de níveis elevados de energia nas cargas indutivas ligadas à linha de alimentação, bem como pré-armazenamento de carga nos capacitores, que se caracterizam por efeitos não desejáveis, com elevados níveis de corrente de "inrush" e sobretensões.

e- Chaves a gás

Estas chaves a gás SF_6 são apropriadas a manobras de bancos de capacitores, e utilizam maneiras distintas para interromper e fechar o circuito.

A interrupção é feita por contatos inseridos em uma câmara selada, com gás SF_6, e uma chave de ar utilizada para o fechamento do circuito.

As chaves a gás apresentam uma baixa erosão dos contatos e operação silenciosa, o que pode vir a ser um fator importante em zonas de densidade elevada de habitantes.

f- Chaves a óleo

Chaves normalmente utilizadas em tensões de distribuição, alguns tipos tem a capacidade para interromper correntes de defeito, além de manobrar bancos de capacitores. No entanto, quando há necessidade de várias manobras diárias, apresenta problemas quanto a erosão de contatos, desgaste do mecanismo de acionamento e deterioração do óleo isolante. Seu uso nestes casos estaria condicionado a um rigoroso controle e inspeção destas partes.

Alguns tipos de chaves a óleo utilizam na operação de bancos de capacitores uma operação de dois estágios, na qual o primeiro é a inserção de resistência no circuito antes da abertura final, como mencionado no item a, conseguiu-se assim, evitar problemas como: alta amplitudes e frequências das correntes de energização e uma redução da possibilidade de reignição na abertura dos contatos.

7- RECOMENDAÇÃO

Diversos fabricantes utilizam fatores de segurança para especificar o equipamento de manobra do banco de capacitores. Conforme [3] o fator de segurança é de 1,35, enquanto, conforme [73] o fator de segurança é 1,25, para bancos de capacitores com neutro não-aterrado e 1,35, para bancos de capacitores

com neutro aterrado. Estes devem ser multiplicado pela corrente nominal do banco de capacitores, visando determinar em primeira etapa a chave necessária para manobrar o banco de capacitores.

Recomenda-se que deve-se procurar uma chave que tenha uma corrente nominal acima do valor da corrente nominal do banco de capacitores, a chave dimensionada deve suportar uma corrente devido: a sobretensão do sistema admissível por norma, e a variação da capacitância do banco de capacitores estipulados por norma, as tabelas 2 e 3, mostram os limites recomendados de acordo com cada norma.

O equipamento de manobra, deve ser capaz de energizar o banco de capacitores e suportar a corrente transitória, no caso de capacitores equipados com relés que automaticamente realizam operações de chaveamento para o controle de tensão de sistemas, a chave requer condições especiais, ou requer uma diminuição forçada da corrente de energização, obrigando-se assim o uso de limitadores de corrente.

Escola Federal de E... Biblioteca MAUÁ BIM ... de Itajubá

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS		
	TENSÃO	TOLERÂNCIA CAPACITIVA	LIMITE RECOMENDADO
IEEE STD 1018-1992 >216 [V]	1,10 U_N	1,15 Q_N	1,265 I_N
IEC 871 - 1 - 1988 >1000 [V]	1,10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS	1,15 Q_N P/ UNIDADE CAPACITIVA OU BANCOS QUE CONTENHAM UMA UNIDADE POR FASE	1,15 I_N
		1,1 Q_N P/ BANCOS ATÉ 30 [MVAr]	1,21 I_N
		1,05 Q_N P/ BANCOS ACIMA DE 30[MVAr]	1,155 I_N
NBR 5282 - 1988 >1000 [V]	1,10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS	1,1 Q_N P/ UNIDADE CAPACITIVAS E BANCOS ATÉ 30 [MVAr]	1,21 I_N
		1,05 Q_N P/ BANCOS ACIMA DE 30[MVAr]	1,155 I_N
ANSI/IEEE STD 18-1980 >216 [V]	1,10 U_N	1,15 Q_N	1,265 I_N
NEMA PUB NO CP1 - 1973 >216 [V]	1,10 U_N	1,15 Q_N	1,265 I_N

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA DE VÁRIAS NORMAS E RECOMENDAÇÕES ACIMA DE 1000 [V]

NORMA OU RECOMENDAÇÃO	CARACTERÍSTICAS COMPARADAS		
	TENSÃO	TOLERÂNCIA CAPACITIVA	LIMITE RECOMENDADO
IEC 871 - 1 - 1988 ≤ 1000 [V]	1,10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS	1,15 Q_N PARA UNIDADE CAPACITIVAS E BANCOS ATÉ 100 [kVAr]	1,265 I_N
		1,1 Q_N PARA BANCOS ACIMA DE 100 [kVAr]	1,155 I_N
NBR 5282 - 1977 ≤1000 [V]	1.10 U_N 12 HORAS EM 24 HORAS	1,1 Q_N P/ UNIDADE CAPACITIVAS E BANCOS	1,21 I_N
ANSI/IEEE STD 18-1980 >216 [V]	1,10 U_N	1,15 Q_N	1,265 I_N
IEEE STD 1018-1992 >216 [V]	1,10 U_N	1,15 Q_N	1,265 I_N
NEMA PUB NO CP1 - 1973 >216 [V]	1,10 U_N	1,15 Q_N	1,265 I_N

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DE TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA DE VÁRIAS NORMAS E RECOMENDAÇÕES ATÉ 1000 [V]

CAPÍTULO VII

FILTROS DE HARMÔNICOS

FILTROS DE HARMÔNICOS

1- INTRODUÇÃO

Com a proliferação das cargas que distorcem as formas de onda da tensão e da corrente (cargas não-lineares) nos sistemas elétricos, tanto as concessionárias como os consumidores, passaram a conviver com o problema da distorção da forma de onda e suas consequências. O uso de equipamentos que distorcem as formas de onda da tensão e corrente estão presentes nos sistemas elétricos, principalmente devido ao avanço da eletrônica de potência nos últimos anos, a qual proporcionou o uso crescente de dispositivos a base de semicondutores.

Como a correção do fator de potência é normalmente feita em sistemas industriais, e como, a instalação de bancos capacitores em derivação são equipamentos adequados a tal finalidade, a probabilidade de ocorrência de ressonância é significativa; e como consequência haverá problemas de sobretensões e sobrecarga.

No Brasil, a nova portaria do DNAEE nº 1569 de 23/12/93, estabeleceu que o fator de potência é de no mínimo 0,92 a partir de março de 1994. Assim pode-se prever que a instalação de bancos de capacitores no sistema elétrico Brasileiro deverá ser da ordem de 6 [GVAr], principalmente, ao se verificar que a partir de abril de 1996, o fator de potência de referência será medido através da média hora a hora ao invés de mensal atual [73].

Assim, este capítulo procura apresentar os critérios para a definição dos filtros de harmônicos criado:

1 - A correção do fator de potência;
2 - A absorção de harmônicos de corrente.

No estudo de filtros de harmônicos, existe a necessidade de se utilizar um programa de fluxo de carga harmônico (FH), para se determinar como os harmônicos "injetados" em certos barramentos se distribuem ao longo do sistema elétrico e, em consequência, procura-se calcular as distorções das tensões nos diversos barramentos. Neste trabalho, utilizou-se também o programa Microtran para o fluxo de harmônicos.

2- FILTROS

As cargas elétricas especiais (CEE) se caracterizam:

1- Pelo baixo fator de potência;
2- Pela distorção das formas de ondas da tensão e da corrente.

Devido aos problemas provocados pelos harmônicos nos sistemas elétricos, faz se necessário que se instalem equipamentos que reduzam os níveis de

distorção das ondas da tensão e corrente. Existem várias técnicas para reduzir os níveis de distorção, entre elas: filtros passivos, eliminação por fluxo magnético, filtros ativos, aumento do números de pulsos dos conversores estáticos, eliminação por injeção de "riplle". Dentre estas os filtros passivos ("shunt") são os mais utilizados.

Os filtros passivos são instalados no sistema elétrico com a finalidade de :

1 - Atendimento aos limites de distorção estabelecidos pela concessionária;
2 - Eliminação de possíveis ressonâncias para os equipamentos e componentes do sistema;

Este trabalho dos filtros é conseguido pela absorção dos harmônicos de corrente em uma determinada parte do sistema numa determinada frequência ou faixa de frequências. Os filtros proporcionam um caminho de baixa impedância para esses harmônicos, evitando-se assim, a proliferação destes harmônicos no restante do sistema. Com isto, consegue-se o principal objetivo que é de reduzir ao máximo a amplitude destes harmônicos, mas uma outra finalidade dos filtros é de corrigir o fator de potência.

Ainda hoje, há estudos sobre a compensação de harmônicos, a diversidade de critérios e limites estabelecidos pelas normas vigentes em outros países é um exemplo das dificuldades que o problema oferece. No Brasil, apesar de ainda não existir uma norma sobre o assunto, nem uma legislação adequada, as concessionárias de energia elétrica vêm praticando alguns limites [63].

Na especificação de filtros devem ser observados alguns critérios básicos:

a- Limites pré-estabelecidos pela concessionária;
b- Obstruir quaisquer possibilidade de ressonância no sistema;
c- Atender ao funcionamento adequados dos filtros.

Estes critérios devem ser atingidos a fim de que se possa obter a maximização na análise de custos e benefícios. Estes critérios devem ser observados levando-se em conta possíveis alterações de composição do sistema e de sua própria evolução. Portanto, deve-se ter filtros confiáveis e operacionalmente flexíveis para atender as necessidades da carga e do sistema.

3- CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS

Os filtros podem ser classificados em função de sua localização, pelo modo de conexão ao sistema elétrico, pelo fator de qualidade (ou faixa de passagem), bem como do número e frequências de seus pontos de ressonância.

Os filtros são normalmente localizados próximos às cargas não-lineares, podendo ser instalados tanto do lado de corrente alternada (CA) como corrente contínua (CC) no caso de conversores. Os filtros no lado CA podem ser conectados no lado primário (da rede) nos transformadores-retificadores, ou no enrolamento terciário se houver. A utilização de filtros no enrolamento terciário tem como vantagem o menor custo, pois os mesmos são isolados para tensões

mais baixas. No entanto, os transformadores com enrolamento terciário são de custos mais elevados.

Com relação ao modo de conexão dos filtros existem dois tipos: Os filtros série e paralelo.

a- Filtro série

A figura 1 mostra um filtro em conexão série. O filtro é ligado em série com o sistema de forma a impedir que um harmônico em uma determinada frequência de (ou faixa de frequência) penetre na direção da carga para o sistema ou vice-versa. Este filtro representa uma grande impedância para o harmônico a qual se deseja evitar. Esta solução é cara e raramente utilizada, tendo como principal ponto negativo o fato dos filtro série serem dimensionados para suportar toda a corrente nominal do circuito onde estão instalados, tornando-se seu custo elevado.

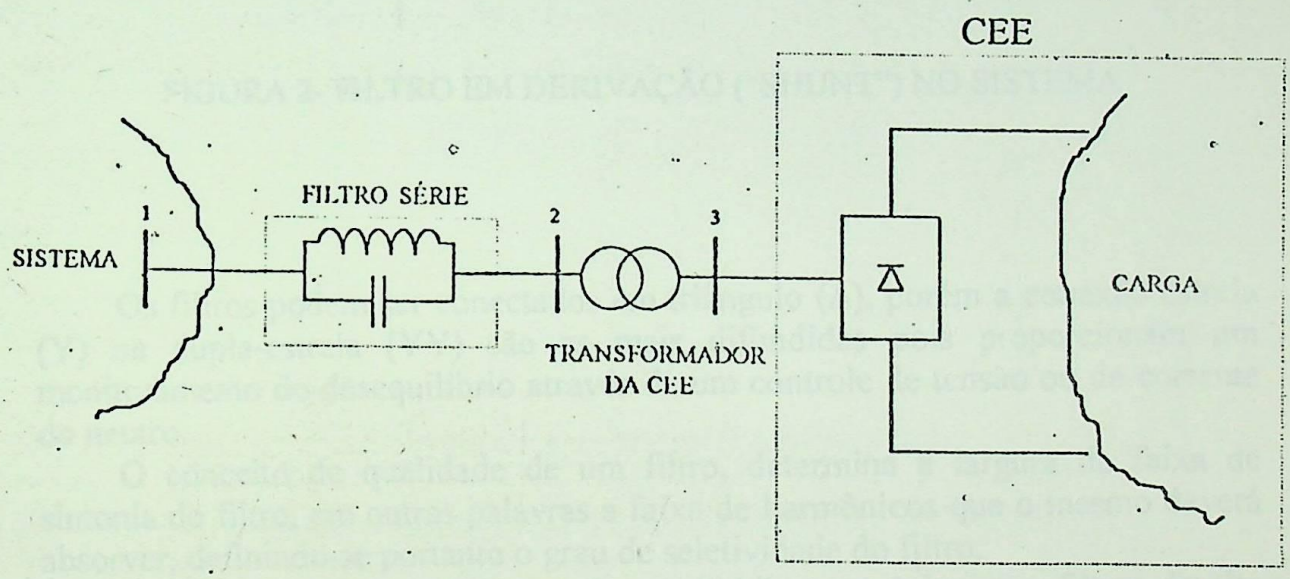


FIGURA 1- FILTRO COM CONEXÃO SÉRIE COM O SISTEMA

b- Filtro derivação ("shunt")

A figura 2 mostra um filtro em derivação ("shunt"). O filtro é ligado em paralelo com o sistema de forma a proporcionar um caminho de baixa impedância para os harmônicos, conseguindo-se com isso a diminuição das amplitude destes harmônicos no restante do sistema e em equipamentos. Na prática esta é a solução mais requerida devido o seu baixo custo e pouca complexidade.

Uma outra vantagem dos filtros "shunt" com relação aos filtros série, é que na frequência fundamental os filtros "shunt", melhoram o fator de potência da instalação, além disso não são projetados para suportar a corrente de linha do sistema, como os filtros série.

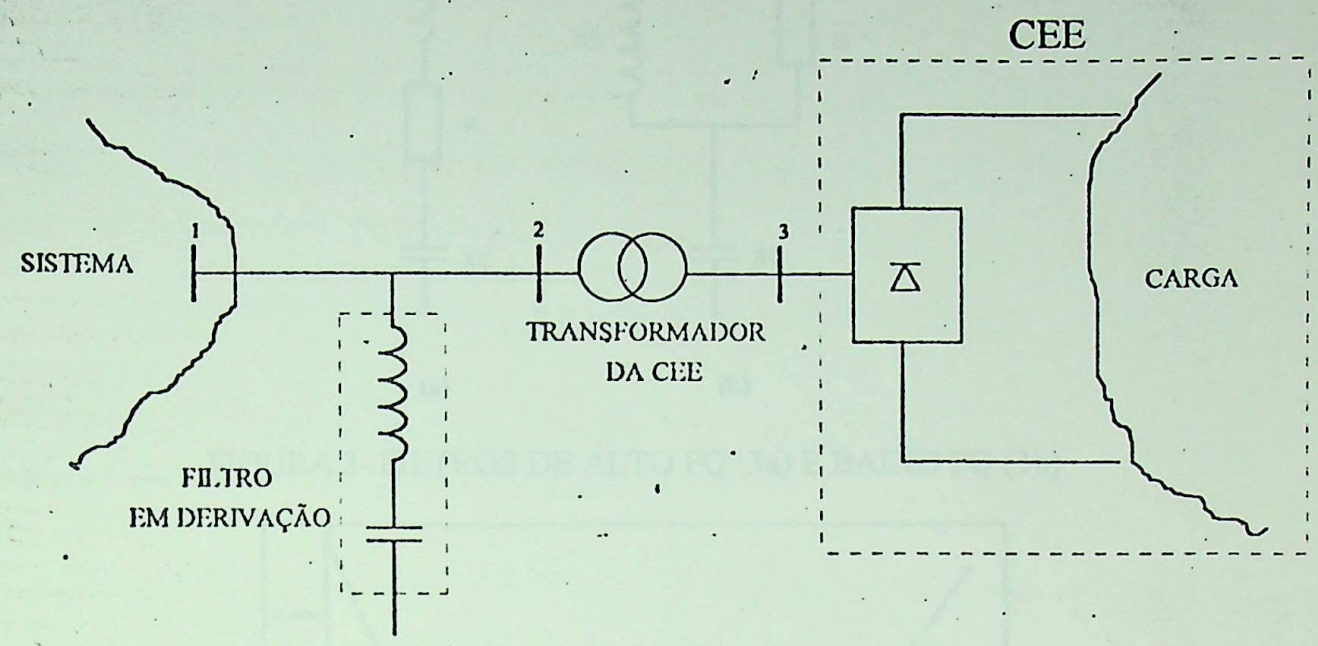


FIGURA 2- FILTRO EM DERIVAÇÃO ("SHUNT") NO SISTEMA

Os filtros podem ser conectados em triângulo (Δ), porém a conexão estrela (Y) ou dupla-estrela (YY) são as mais difundidas pois proporcionam um monitoramento do desequilíbrio através de um controle de tensão ou de corrente do neutro.

O conceito de qualidade de um filtro, determina a largura da faixa de sintonia do filtro, em outras palavras a faixa de harmônicos que o mesmo deverá absorver, definindo-se portanto o grau de seletividade do filtro.

O fator de qualidade (FQ), pode ser dividido em dois tipos: filtros de alto FQ (sintonizados ou faixa estreita) e os filtros de baixo FQ (amortecidos ou faixa larga).

Os filtros de alto FQ são normalmente utilizados para o 5º, 7º, 11º e 13º harmônicos e alguns até o 15º . Um filtro de baixo FQ é normalmente utilizado para filtrar harmônicos acima do 17º ordem. Este último é denominado de filtro passa faixa (amortecido), mas se necessário podem ser utilizados em harmônicos de ordens mais baixas.

Os filtros de fator de qualidade elevado (entre 30 e 80 [72]) possuem uma sintonia adequada em uma determinada faixa de frequência, podendo também ser do tipo de sintonia dupla, embora este último seja pouco utilizado. Os filtros amortecido possuem um baixo fator de qualidade usualmente na faixa de 1 a 10 [72].

A figura 3 mostra a representação dos filtros de alto e baixo FQ que serão utilizados neste capítulo, e as figuras 4 e 5 mostram as variações típicas de impedância com a frequência.

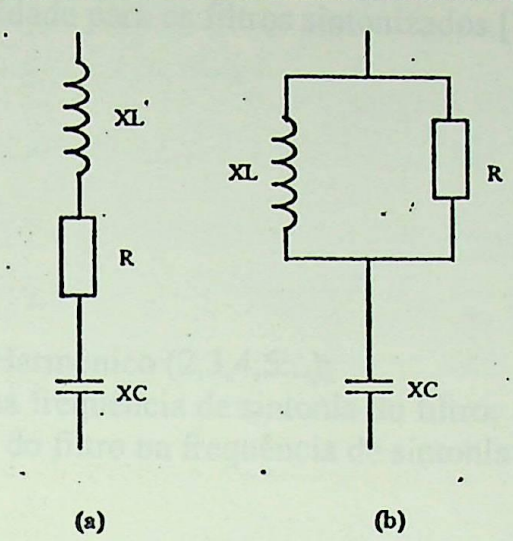


FIGURA 3- FILTROS DE ALTO FQ (3a) E BAIXO FQ (3b)

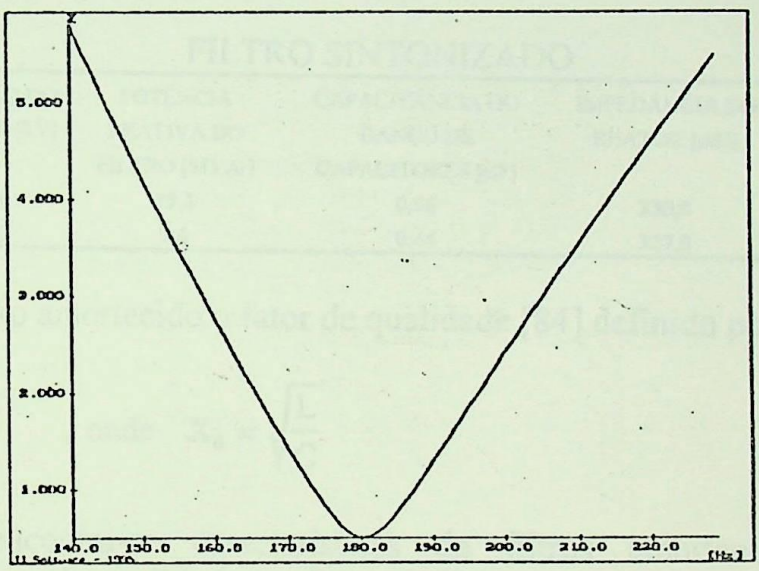


FIGURA 4- FILTRO SINTONIZADO (FAIXA ESTREITA)

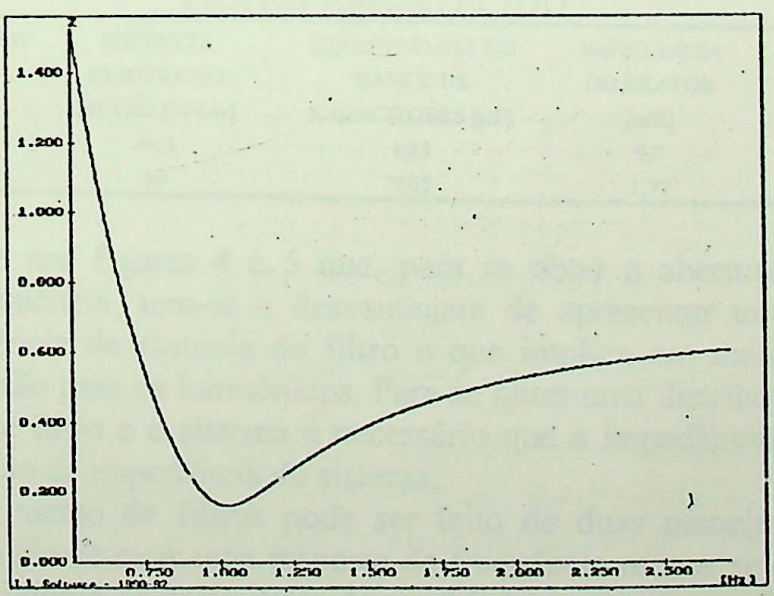


FIGURA 5- FILTRO AMORTECIDO (FAIXA LARGA)

O fator de qualidade para os filtros sintonizados [72]é definido como:

$$FQ = \frac{X_n}{R_n} \qquad (1)$$

onde:

n - Ordem do Harmônico (2,3,4,5...);
X_n- Reatância na frequência de sintonia do filtro;
R_n- Resistência do filtro na frequência de sintonia do filtro.

Escol... de Engenha... Biblioteca MAUÁ BIM ...de Itajubá - EFEI

Abaixo encontra-se características de filtros sintonizados com seus respectivos fatores de qualidade conforme [83].

FILTRO SINTONIZADO

ORDEM DO FILTRO	TENSÃO DO FILTRO [kV]	POTÊNCIA REATIVA DO FILTRO [MVAr]	CAPACITÂNCIA DO BANCO DE CAPACITORES [μF]	IMPEDÂNCIA DO REATOR [mH]	X_n [Ω]	FQ	R_n [Ω]
5	230	19,3	0,86	330,0	622,5	59	9,6
7	230	9,6	0,44	327,0	862,9	57	15,1

Para o filtro amortecido o fator de qualidade [84] definido por:

$$FQ = \frac{R_n}{X_S} \quad , \text{onde} \quad X_S = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (2)$$

Abaixo encontra-se características de filtros amortecido com seus respectivos fatores de qualidade conforme [83].

FILTRO AMORTECIDO

TENSÃO DO FILTRO [kV]	POTÊNCIA REATIVA DO FILTRO [MVAr]	CAPACITÂNCIA DO BANCO DE CAPACITORES [μF]	IMPEDÂNCIA DO REATOR [mH]	X_S [Ω]	FQ	R_n [Ω]
275	44,5	1,81	9,7	73,2	4	294
150	80	9,95	1,77	13,3	2	26,7

Observa-se nas figuras 4 e 5 que, para se obter a abertura da curva de resposta de frequência, tem-se a desvantagem de apresentar uma impedância maior na frequência de sintonia do filtro o que implica em maiores níveis de distorção de tensão para os harmônicos. Para se obter uma distribuição adequada de corrente entre filtro e o sistema é necessário que a impedância do filtro seja apenas uma fração da impedância do sistema.

O amortecimento de filtros pode ser feito de duas maneiras. Para filtro sintonizado, quando se quer uma resposta da frequência menos seletiva, é viável a utilização de sintonia de baixo fator de qualidade, reatores com FQ na faixa de 30 (na frequência de sintonia). Enquanto que o uso de resistores de

amortecimento em paralelo com os reatores é uma forma indicada para filtros amortecidos, podendo-se obter qualquer valor de FQ.

4- RESSONÂNCIA DEVIDO AOS HARMÔNICOS

De um modo bastante simplificado pode-se dizer que as impedâncias de um sistema elétrico são composta por combinações série e paralelo de resistências, capacitâncias e indutâncias. Seu comportamento com a frequência apresenta, portanto, pontos de ressonância, isto é, frequências para as quais as impedâncias do sistema assume um valor máximo (ressonância paralela) ou mínima (ressonância série), nestes casos podem surgir sobretensões ou sobrecargas respectivamente.

A frequência de sintonia em um circuito ideal L, C é obtida quando:

$$X_L = X_C \tag{3}$$

onde:

X_L- Reatância indutiva;
X_C- Reatância capacitiva.

A frequência de ressonância é, neste caso, dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L.C}} \tag{4}$$

onde:

f_n - Frequência de ressonância;
L - Indutância do circuito, em [H];
C - Capacitância do circuito, em [F].

De (3) e (4) pode-se obter:

$$n = \frac{f_n}{f_1} \tag{5}$$

onde:

f_1 - Frequência industrial do sistema (no Brasil, 60 [Hz]).

As duas formas de ressonância que podem ser considerada são: ressonância série ou paralela.

Quando um circuito encontra-se em ressonância série, a corrente torna-se elevada e a tensão mínima no trecho compreendido entre a reatância capacitiva e a reatância indutiva. Assim sendo, a impedância do trecho no circuito, reduz-se a resistência do trecho, e sendo esta componente pequena, tem-se uma corrente circulante elevada. Do ponto de vista prático a condição de ressonância série pode ocorrer entre um banco de capacitores e a fonte (transformador da

indústria). A figura 7 (ver anexo 17) mostra o resultado de uma simulação para o sistema apresentado na figura 6.e observa-se que à medida que a frequência vai se aproximando da frequência de ressonância, que neste caso é o sétimo harmônico, a tensão no trecho das barras 1 e 2 da figura 7 vai diminuindo, caracterizando-se um curto-circuito.

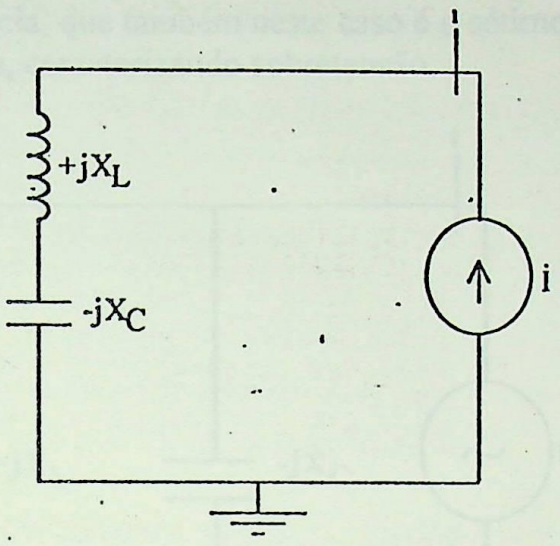


FIGURA 6- CIRCUITO PARA O CASO DE RESSONÂNCIA SÉRIE

onde:

i - Corrente da fonte.

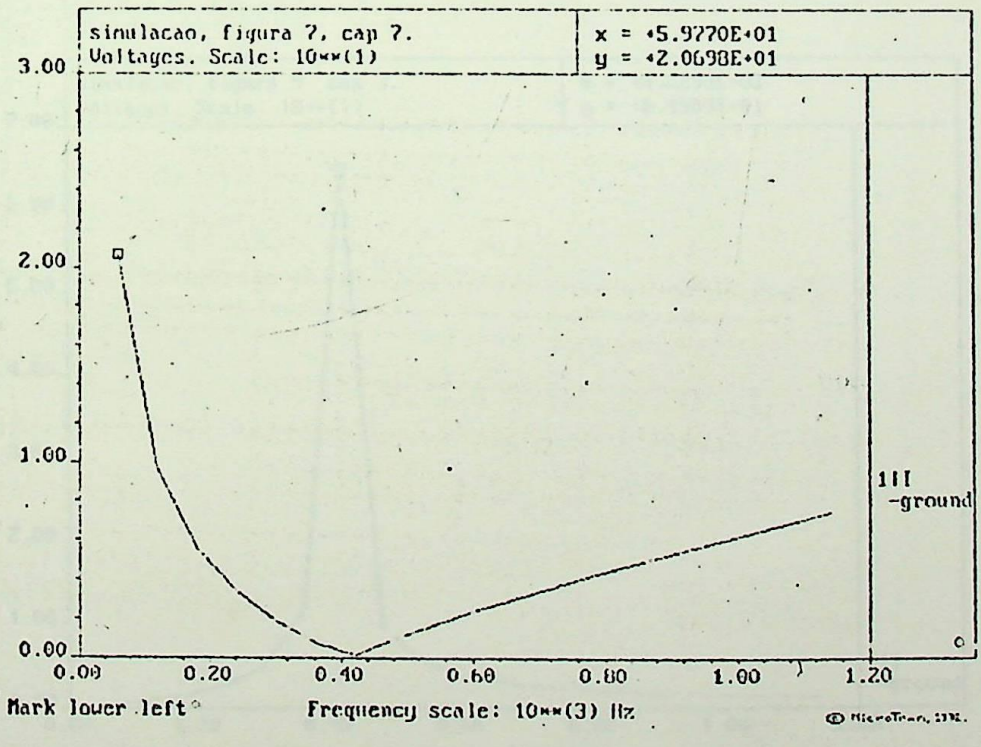


FIGURA 7- SIMULAÇÃO DE UM CASO DE RESSONÂNCIA SÉRIE

A condição para que ocorra a ressonância paralela é igual a da ressonância série, isto é $X_L=X_C$. A figura 8 mostra um circuito para a condição de ressonância paralela. A impedância para o caso de ressonância paralela é uma impedância infinitamente alta no ponto de ressonância, ocasionado-se sobretensões perigosas a integridade do sistema. A figura 9 mostra uma simulação do caso da figura 8 (ver anexo 18), observa-se que a medida que a frequência aproxima-se da frequência de ressonância, que também neste caso é o sétimo harmônico, a tensão vai se tornando elevada, caracterizando sobretensão.

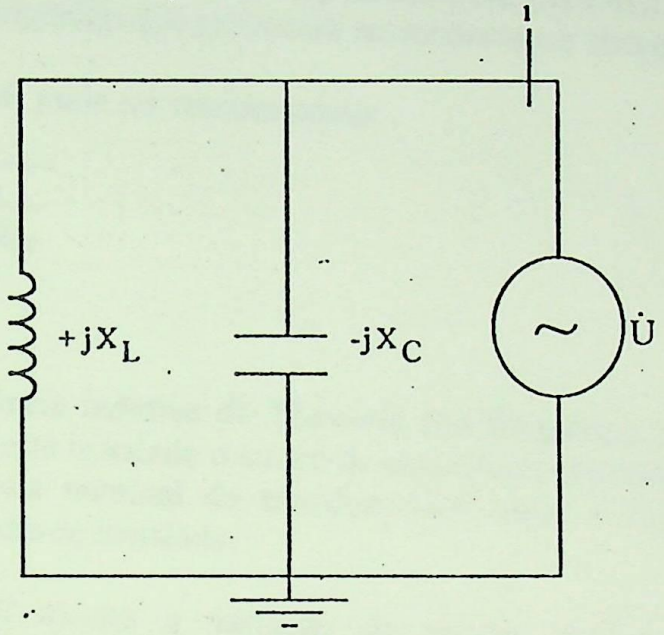


FIGURA 8- CIRCUITO PARA A CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA PARALELA

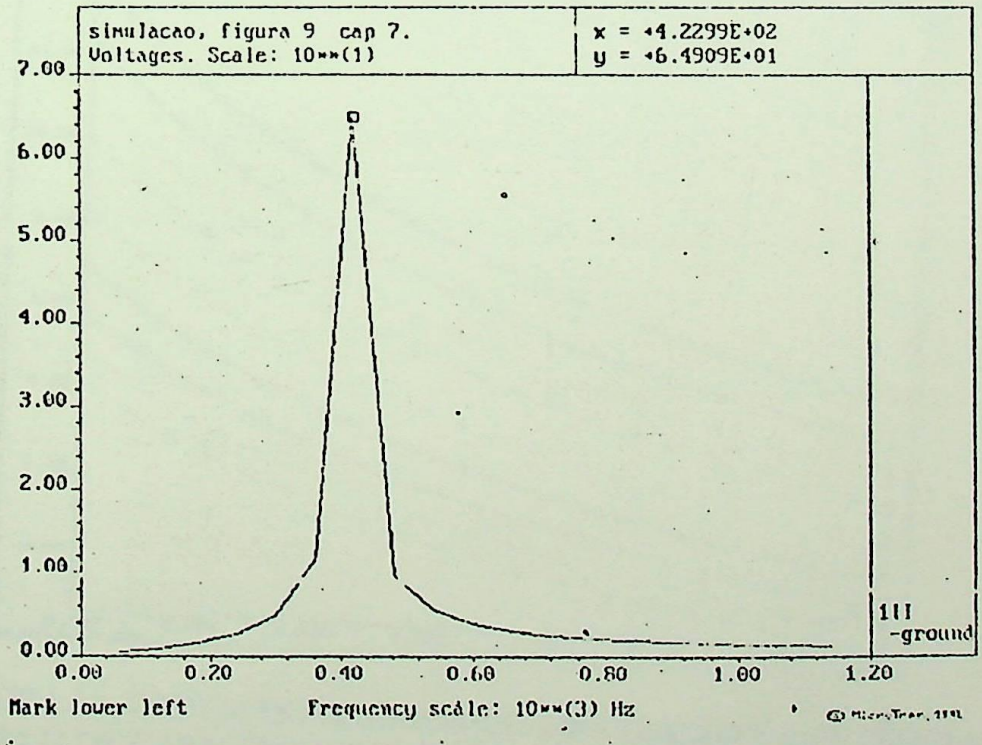


FIGURA 9- SIMULAÇÃO DO CASO DE RESSONÂNCIA PARALELA

Para fins práticos, a ordem do harmônico que poderá provocar uma ressonância em um sistema pode ser dado pela equação 6 [73].

$$n_S = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_{BC}}} \qquad (6)$$

onde:

S_{CC} - Potência de curto-circuito na barra no qual está conectado o banco de capacitores em [MVA];

Q_{BC} - Potência do banco de capacitores, em [MVAr];

n_S - Harmônico que provocará ressonância no sistema.

A equação 6, pode ser rescrita como:

$$n_S = \sqrt{\frac{S_{TN}}{X_{THI} \cdot Q_{BC}}} \qquad (7)$$

Onde:

X_{THI} - Reatância indutiva de Thevenin (na frequência industrial) na barra onde está instalado o banco de capacitores (na base S_{TN});

S_{TN} - Potência nominal do transformador onde o banco de capacitores encontra-se instalado.

A figura 10 mostra a variação da ordem do harmônico para uma determinada potência do banco de capacitores com relação a potência do transformador [66].

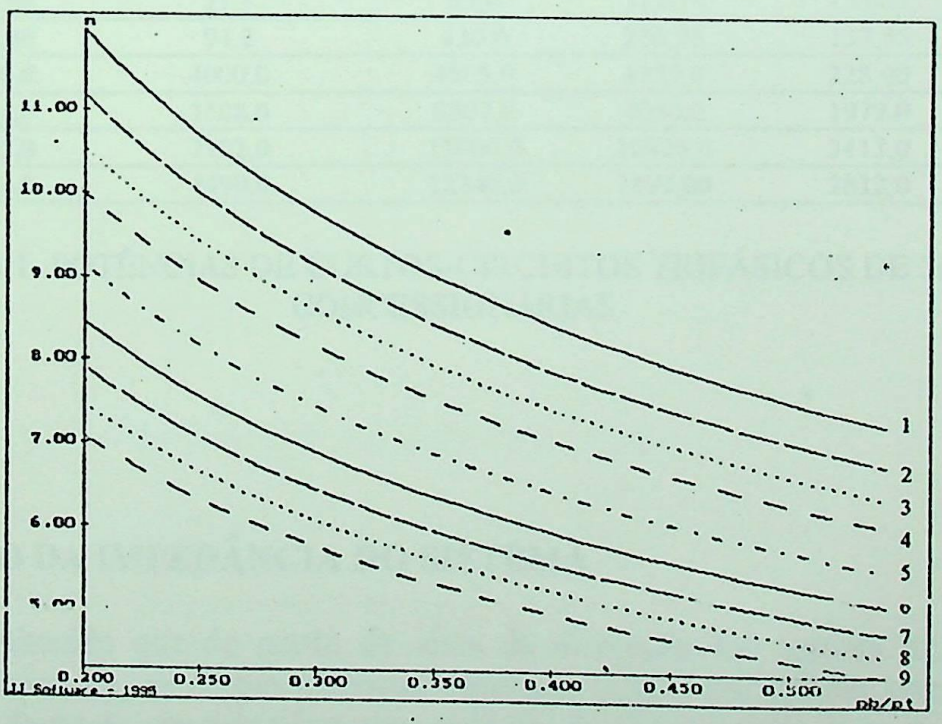


FIGURA 10- ORDEM DO HARMÔNICO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DE UM BANCO DE CAPACITORES EM RELAÇÃO A DO TRANSFORMADOR

onde:

curva 1 ..... X_{THI} = 3,5%
curva 2 ..... X_{THI} = 4,0%
curva 3 ..... X_{THI} = 4,5%
curva 4 ..... X_{THI} = 5,0%
curva 5 ..... X_{THI} = 6,0%
curva 6 ..... X_{THI} = 7,0%
curva 7 ..... X_{THI} = 8,0%
curva 8 ..... X_{THI} = 9,0%
curva 9 ..... X_{THI} = 10,0%

Para fins de ordem de grandeza, a tabela 1 mostra os valores médio, máximo, mínimo e o desvio padrão das potências de curtos-circuitos trifásicos de várias concessionárias para diferentes níveis de tensões.

TENSÃO [kV]	MENOR VALOR [MVA]	MAIOR VALOR [MVA]	MÉDIA [MVA]	DESVIO PADRÃO [MVA]
13,80	9,40	160,0	60,863	52,403
34,50	21,3	67,6	31,625	15,007
69,00	94,2	410,0	236,95	137,55
138,0	4000,0	4555,0	4259,0	228,00
230,0	1508,0	8502,0	4090,0	1979,0
345,0	7102,0	15000,0	10826,0	3113,0
500,0	4490,0	12340,0	7899,00	2812,0

TABELA 1- POTÊNCIAS DE CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS DE 3(TRÊS) CONCESSIONÁRIAS

5- EFEITO DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA

É conhecido que do ponto de vista da distorção das formas de onda da tensão e corrente, as cargas elétricas especiais (CEE) podem ser consideradas como uma fonte de corrente ideal para cada um dos harmônicos de corrente.

O sistema representado na figura 11 ilustra uma CEE caracterizada por uma ponte conversora e a figura 12 o sistema equivalente com a fonte de corrente representando os harmônicos injetados no sistema.

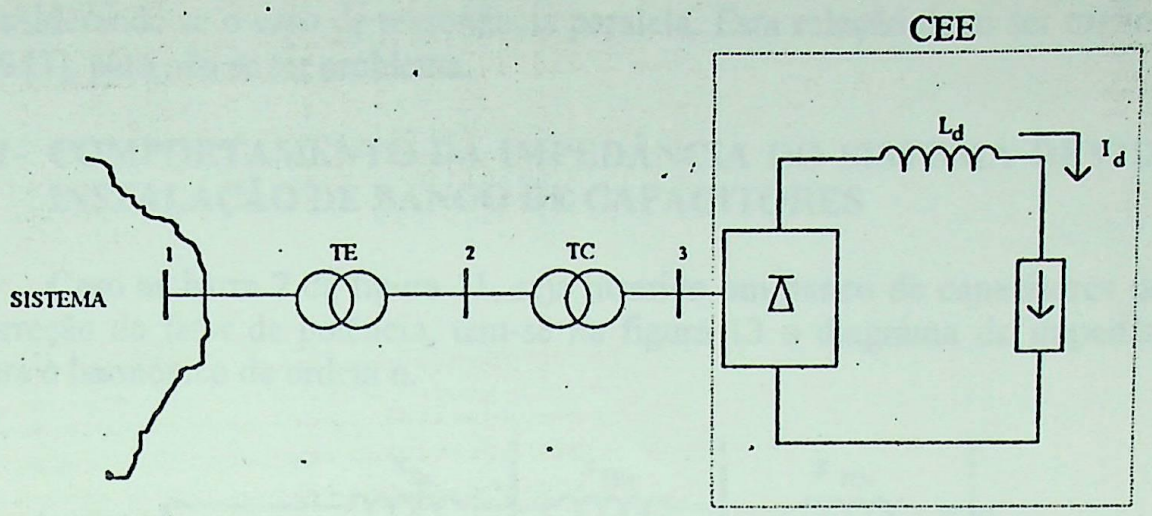


FIGURA 11- SISTEMA CARACTERIZADO POR UMA PONTE CONVERSORA

onde:

- TE - Transformador de entrada;
- TC - Transformador da ponte conversora;
- Id - Corrente de carga no lado CC da ponte conversora;
- L_d - Indutância de alisamento.

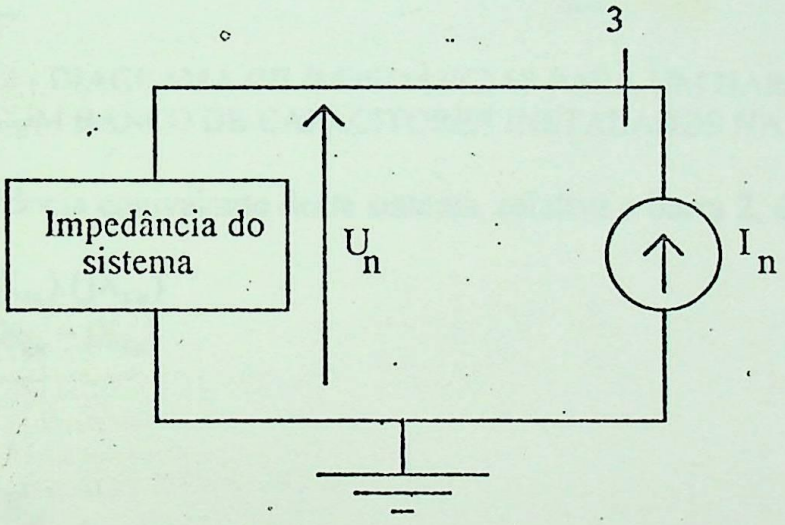


FIGURA 12- REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA COM A FONTE DE CORRENTE DEVIDO AOS HARMÔNICOS DA CEE

onde:

U_n - Tensão individual para o harmônico de ordem n.

Em redes não muito fortes (baixa potência de curto-circuito), os harmônicos de corrente da CEE podem provocar elevados harmônicos de tensão. A figura 12 apresenta o sistema equivalente "visto" pela carga elétrica especial e nota-se que existe um aumento na distorção total da tensão do sistema, para impedância do sistema elevada.

A intensidade dos harmônicos de tensão na rede vai depender da relação entre a potência do conversor e a potência de curto-circuito da rede, não

considerando-se o caso de ressonância paralela. Esta relação deve ser menor que 2% [1], para não se ter problema.

5.1- COMPORTAMENTO DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA DEVIDO A INSTALAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES

Caso na barra 2 da figura 11, seja inserido um banco de capacitores para a correção do fator de potência, tem-se na figura 13 o diagrama de impedâncias para o harmônico de ordem n.

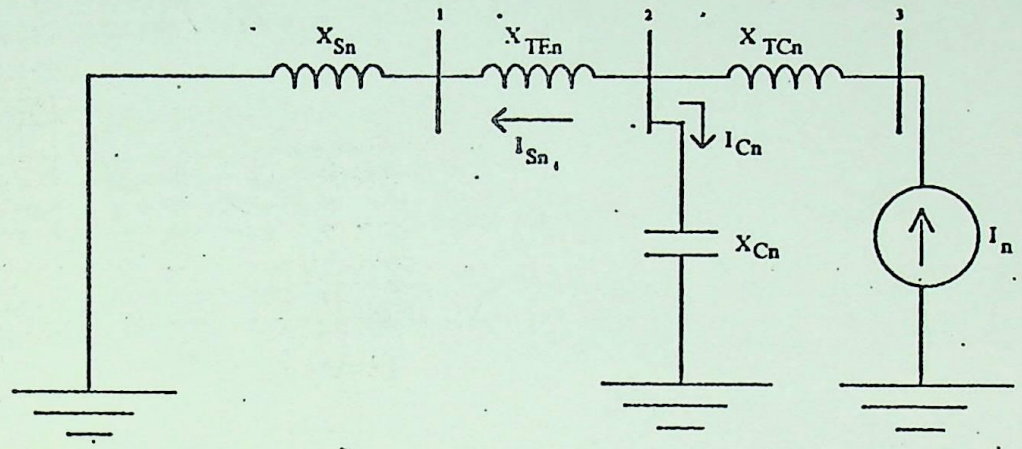


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIAS PARA UM HARMÔNICO DE ORDEM n COM BANCO DE CAPACITORES INSTALADOS NA BARRA 2 [73]

A impedância equivalente deste sistema, relativa a barra 2, é dada por:

$$\dot{Z}_{2n} = \frac{(jX_{Sn}).(jX_{Cn})}{(jX_{Sn} - jX_{Cn})} \tag{8}$$

Onde:

$$X_{Sn} = n.X_{S1} \tag{9}$$

$$X_{Cn} = \frac{X_{C1}}{n} \tag{10}$$

A ressonância ocorre quando $X_{Sn} = X_{Cn}$. Assim, conforme [73], pode-se obter:

$$X_{C1} = n_S^2.X_{S1} \tag{11}$$

a impedância equivalente do sistema, será:

$$\dot{Z}_{2n} = jX_{S1}.\left[\frac{n.n_S^2}{n_S^2 - n}\right] \tag{12}$$

A corrente de ordem n no capacitor do sistema apresentado na figura 12, é dada por:

$$I_{Cn} = I_n \cdot \frac{n^2}{n^2 - n_S^2} \qquad (13)$$

onde nas equações anteriores:

- I_n - Corrente injetada pela CEE para um harmônico de ordem n;
- I_{Sn} - Corrente absorvida pelo sistema para um harmônico de ordem n;
- I_{Cn} - Corrente absorvida pelo banco de capacitores para um harmônico de ordem n;
- X_{TEn} - Reatância indutiva do transformador do sistema para um harmônico de ordem n;
- X_{TCn} - Reatância indutiva do transformador da CEE para um harmônico de ordem n;
- X_{Sn} - Reatância indutiva do sistema para um harmônico de ordem n;
- X_{Cn} - Reatância capacitiva do banco de capacitores para um harmônico de ordem n;
- Z_{2n} - Impedância equivalente "vista da barra 2" para um harmônico de ordem n;
- n_S - Ordem do harmônico que provocará a ressonância;
- X_{C1} - Reatância do banco de capacitores na frequência fundamental;
- X_{S1} - Reatância equivalente vista na barra 1 na frequência fundamental.

Considerando-se para a equação 13 uma corrente I_n igual a 1 [pu], pode-se determinar a corrente que passa pelo banco de capacitores. A figura 14 ilustra tal corrente para diversos valores de n_S. Observa-se na figura 14 que, a medida que n aproxima-se de n_S (ponto de ressonância), os valores de corrente vão tornando-se mais elevados.

OBSERVAÇÃO: Nas figuras 14 e 16, utilizaram-se uma variação de 0,01 para n, entretanto caso seja utilizado outra varredura, novos resultados serão obtidos, podendo ser maiores ou menores.

Na equação 11, caso os valores de n_S seja 5, significa que a potência do banco de capacitores é 25 vezes menor que a potência de curto-circuito na barra onde este está instalado, com isso, caso exista um harmônico de quinta ordem (n=5), na equação 13, verifica-se que a corrente *teoricamente* tenderá ao infinito, devido o banco de capacitores entrar em ressonância com o sistema. Na equação 14, nota-se que a tensão também tenderá ao infinito.

$$\dot{U}_{2n} = \dot{Z}_{2n} \cdot \dot{I}_{Cn} \qquad (14)$$

Logo pode-se concluir que, problemas de ressonância paralela, e portanto, sobretensões, podem ocorrer na instalação de bancos de capacitores em sistemas onde os harmônicos se fazem presentes.

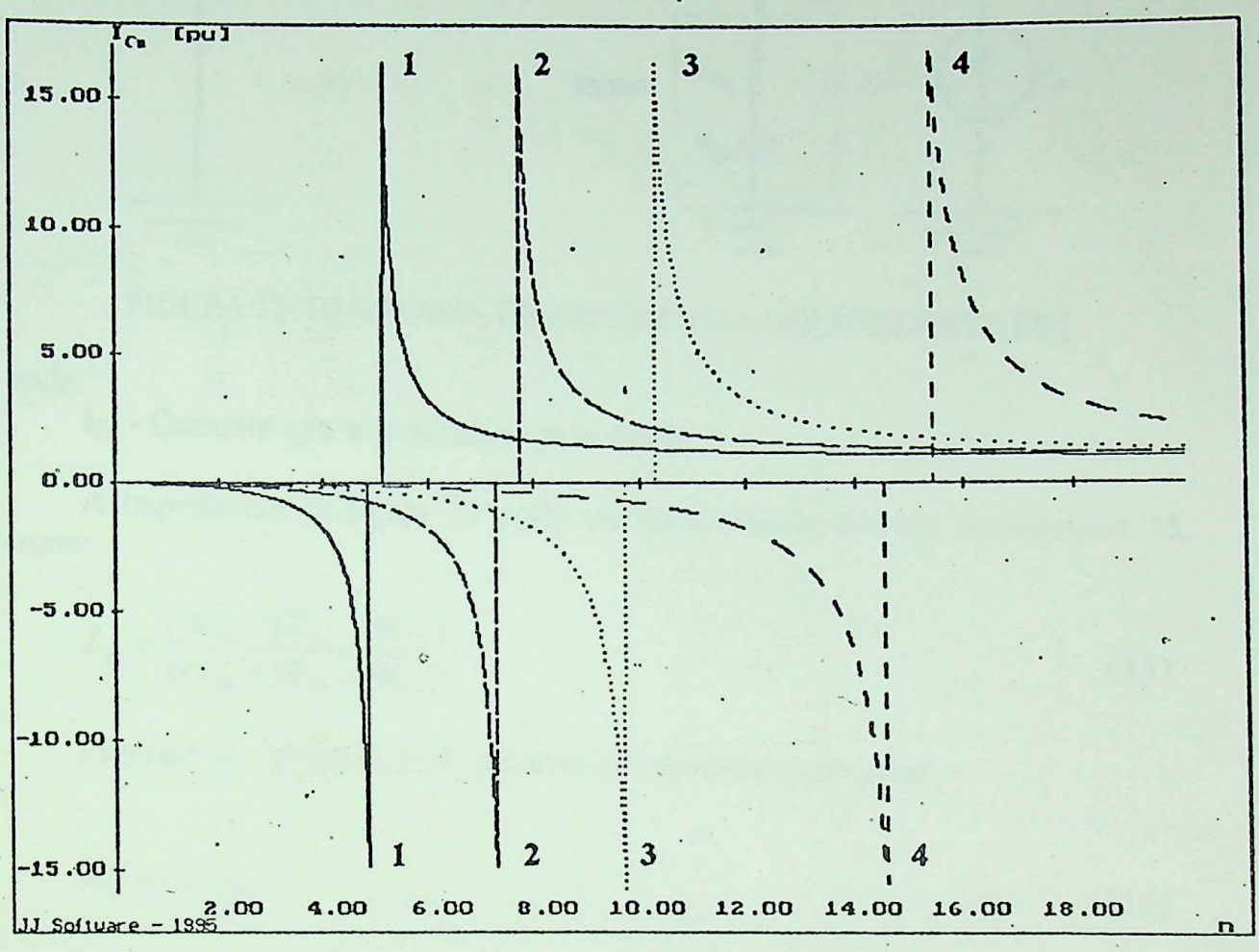


FIGURA 14- CURVA CARACTERÍSTICA DE CORRENTE NO BANCO DE CAPACITORES EM FUNÇÃO DA ORDEM DO HARMÔNICO EXISTENTE TOMADO SENDO 1 [PU] ([73])

onde:

Curva 1 - $n_S = 5$;
Curva 2 - $n_S = 7{,}5$;
Curva 3 - $n_S = 10$;
Curva 4 - $n_S = 15$.

5.2- COMPORTAMENTO DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA DEVIDO A INSTALAÇÃO DE FILTROS

Caso seja inserido um filtro de harmônicos sintonizado na barra 2 no sistema da figura 11, tem-se o diagrama de impedâncias para o harmônico de ordem n, mostrado na figura 15.

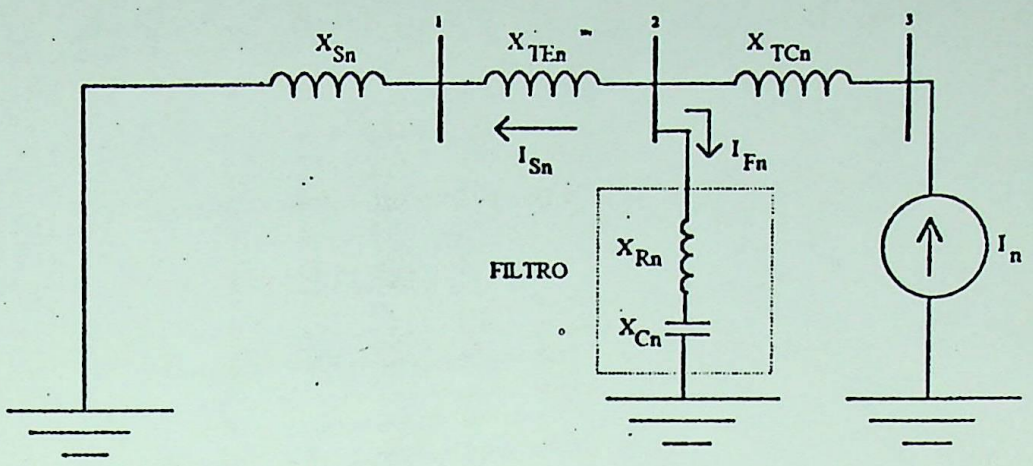


FIGURA 15- DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE [73]

onde:

I_{Fn} - Corrente que se estabelece pelo filtro.

A impedância da figura 15 pode ser equacionada através da equação 15, como:

$$\dot{Z}_{2n} = \frac{(jX_{Sn}).(jX_{Rn} - jX_{Cn})}{(jX_{Sn} + jX_{Rn} - jX_{Cn})} \qquad (15)$$

Fazendo-se a frequência de ressonância do filtro (n_F) como:

$$X_{C1} = n_F^2 . X_{R1} \qquad (16)$$

Utilizando as equações 9, 10, 11 e 15, a impedância equivalente [73] é dada por.

$$\dot{Z}_{2n} = jX_{S1} \cdot \left[\frac{n.\left[(n.n_S)^2 - (n_S.n_F)^2\right]}{(n.n_F)^2 + (n.n_S)^2 + (n_S.n_F)^2} \right] \qquad (17)$$

A corrente no filtro (I_{Fn}) será dada por:

$$I_{Fn} = In. \left[\frac{(n.n_F)^2}{(n.n_F)^2 + (n.n_S)^2 - (n_S.n_F)^2} \right] \qquad (18)$$

A curva característica da corrente I_{Fn} para I_n igual a 1 [pu], para os mesmos valores de n_S definidos no item anterior está apresentada na figura 16.

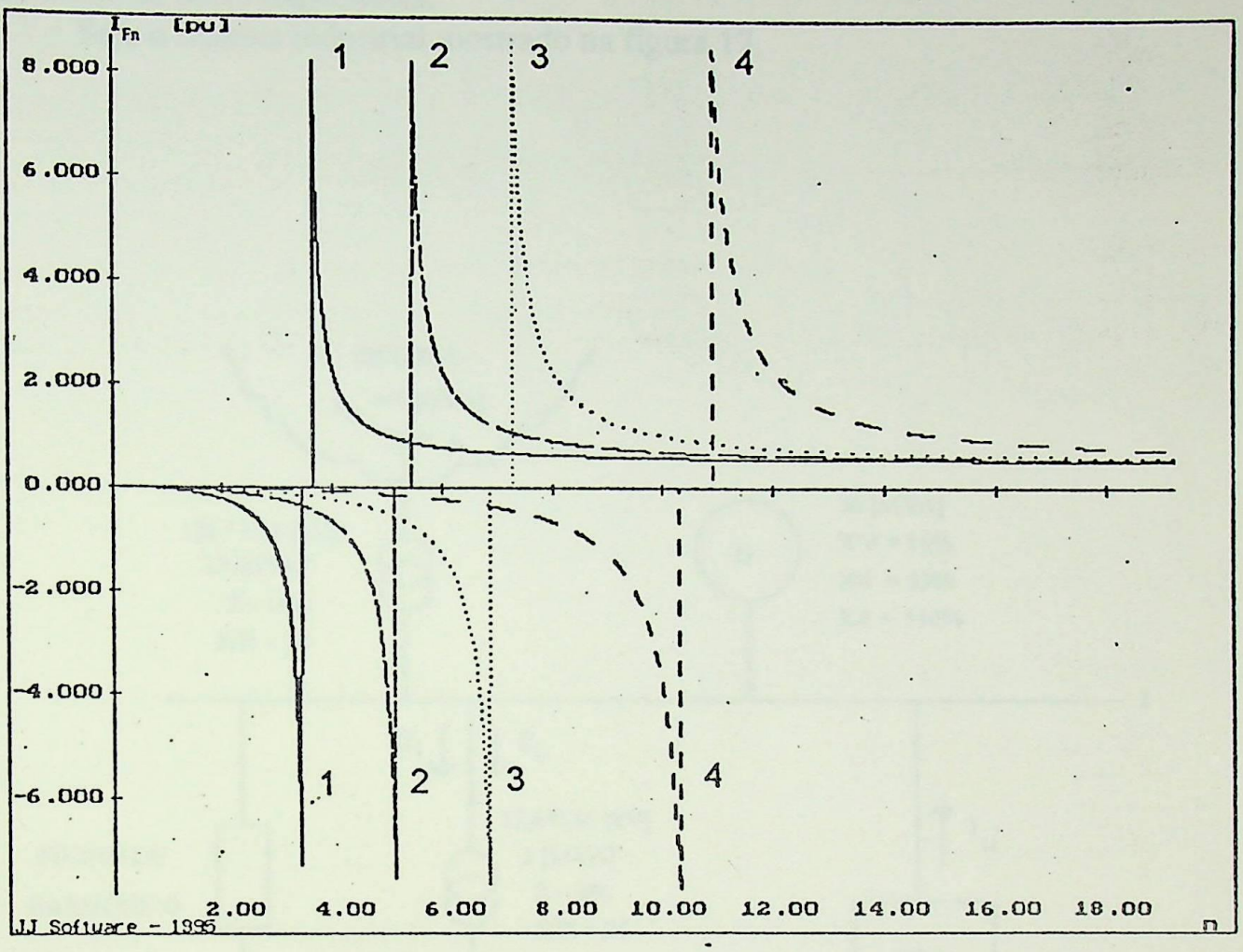


FIGURA 16- CURVA CARACTERÍSTICA DE CORRENTE NO FILTRO EM FUNÇÃO DA ORDEM DO HARMÔNICO EXISTENTE TOMADO COM SENDO DE 1[PU] [73]

Comparando-se a equação (13) com a equação (18), observa-se na equação (18) que a instalação de filtros altera o valor da frequência de ressonância do sistema.

A instalação de filtros de harmônicos no sistema para um determinado harmônico (filtro sintonizado) ou faixa de harmônicos (filtro amortecido), altera o valor da frequência de ressonância do sistema, e como frequências de ressonância não múltiplos inteiros da fundamental (acima uma vez da frequência fundamental) são difíceis de serem encontrados, deve-se tomar o cuidado para que no projeto de um filtro, este não venha a alterar o valor da frequência de ressonância do sistema para uma frequência de ressonância próximo a um número inteiro (múltiplo da fundamental), principalmente no caso em que cargas elétricas especiais estejam presentes no sistema, e possuam um harmônico característico nesta nova frequência.

6- FILTROS PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Os filtros são instalados no sistema elétrico com a finalidade de evitar sobretensões devido aos harmônicos de corrente, proporcionando para estes um caminho de baixa impedância.

Seja o sistema industrial mostrado na figura 17.

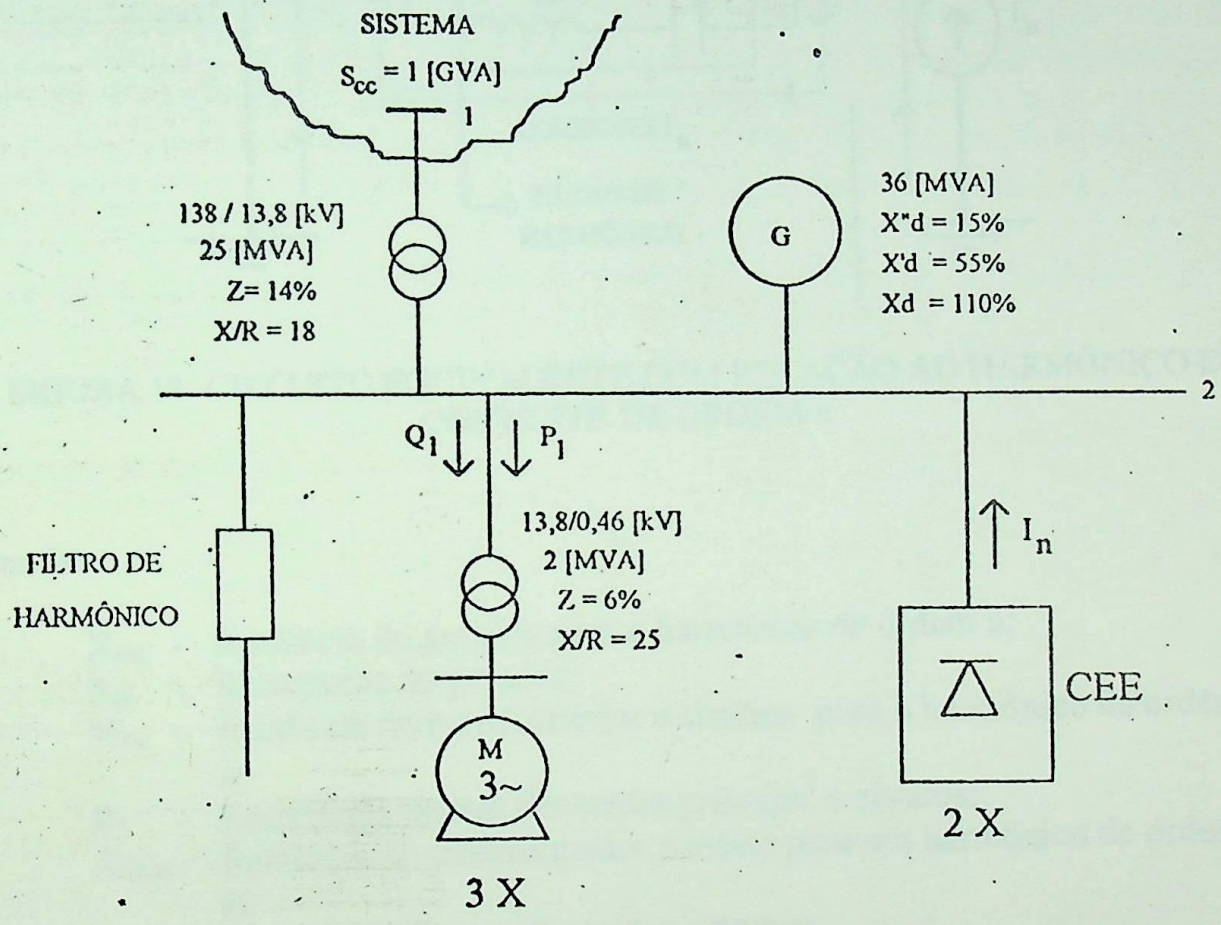


FIGURA 17- SISTEMA INDUSTRIAL EM ANÁLISE

O circuito equivalente do sistema da figura 17 para um harmônico de ordem n, está representado na figura 18.

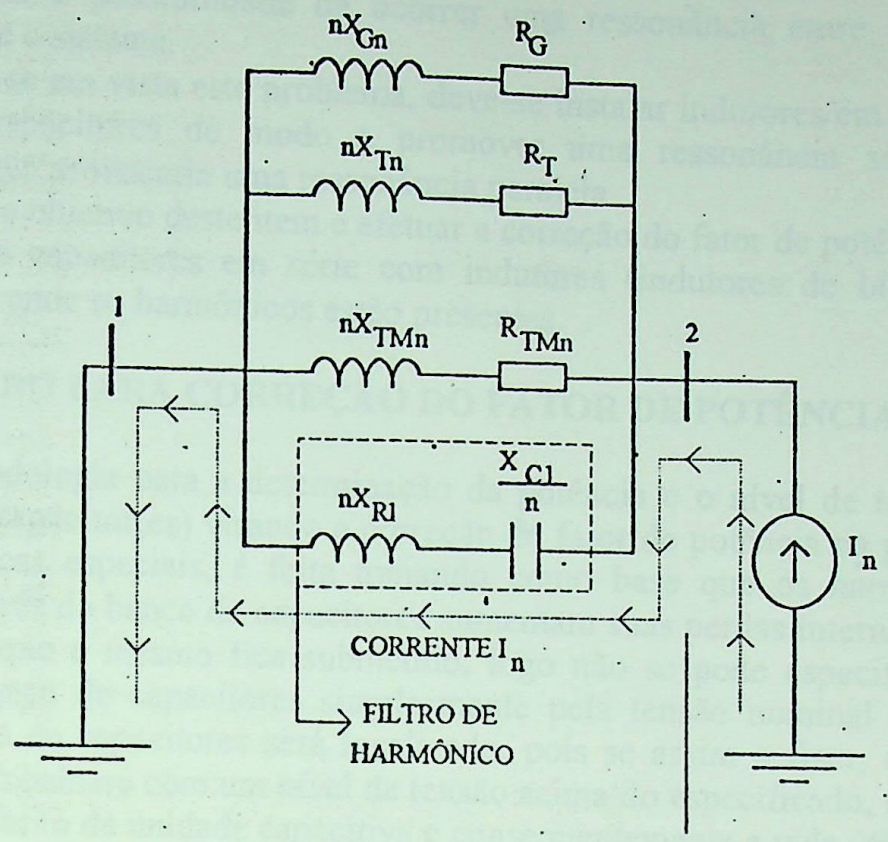


FIGURA 18- CIRCUITO EQUIVALENTE COM RELAÇÃO AO HARMÔNICO DE CORRENTE DE ORDEM n

onde:

- X_{Gn} - Reatância do gerador para o harmônico de ordem n;
- R_G - Resistência do gerador;
- X_{Tn} - Reatância do transformador e sistema para o harmônico de ordem n;
- R_T - Resistência do transformador principal e sistema;
- X_{TMn} - Reatância do transformador e motor para um harmônico de ordem n;
- R_{TM} - Resistência do transformador e motor;
- X_{RI} - Reatância do reator do filtro a frequência fundamental;
- X_{CI} - Reatância do banco de capacitores do filtro a frequência fundamental.

Na figura 18, observa-se que o harmônico de ordem corrente n deverá circular em sua maioria pelo filtro, e os harmônicos de corrente em pouca porcentagem deverá circular entre o restante do sistema.

7- PROJETO DE UM FILTRO VISANDO A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A instalação de um banco de capacitores visando a correção do fator de potência, em barramentos onde existem cargas elétricas especiais é um problema

devido existir a possibilidade de ocorrer uma ressonância entre o banco de capacitores e o sistema.

Tendo-se em vista este problema, deve-se instalar indutores em série com o banco de capacitores de modo a promover uma ressonância série para o harmônico que provocaria uma ressonância paralela.

Assim o objetivo deste item é efetuar a correção do fator de potência através de banco de capacitores em série com indutores (indutores de bloqueio) em barramentos onde os harmônicos estão presentes.

7.1- ROTEIRO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A metodologia para a determinação da potência e o nível de tensão do(s) banco(s) de capacitor(es) visando a correção do fator de potência na presença de cargas elétricas especiais, é feita tomando como base que os harmônicos de corrente através do banco de capacitores aumentam suas perdas internas e o nível de tensão a que o mesmo fica submetido, logo não se pode especificar nestes casos um banco de capacitores simplesmente pela tensão nominal do sistema onde o banco de capacitores será localizado, pois se assim o fizer, o banco de capacitores trabalhará com um nível de tensão acima do especificado, diminuindo a vida da isolação da unidade capacitiva e consequentemente a vida útil.

A vida útil de um capacitor submetido a uma tensão acima da nominal deste, pode ser determinado apartir da equação 19 [72]:

$$VU = \left[\frac{1}{\overline{U}.T}\right]^{\alpha} \qquad (19)$$

onde:

VU - Valor em [pu] da vida útil em relação as condições nominais;
T - Temperatura máxima no dielétrico em [pu] da nominal;
$\overline{U}$ - Sobretensão em [pu] da nominal;
α - Expoente de valor típico da ordem de 7 a 9.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

A figura 19 mostra um gráfico relativo a equação 19 em função da tensão aplicada aos terminais do banco de capacitores para alguns valores de temperatura do capacitor.

A seguir mostra-se a sequência da metodologia para a correção do fator de potência na presença de cargas elétricas especiais.

7.1.a- *LEVANTAMENTO DE DADOS*

Consiste em obter os dados das cargas, transformadores, cabos, linhas, reatores, máquinas rotativas, pontes conversoras, etc, do sistema elétrico no qual deseja-se fazer a correção do fator de potência.

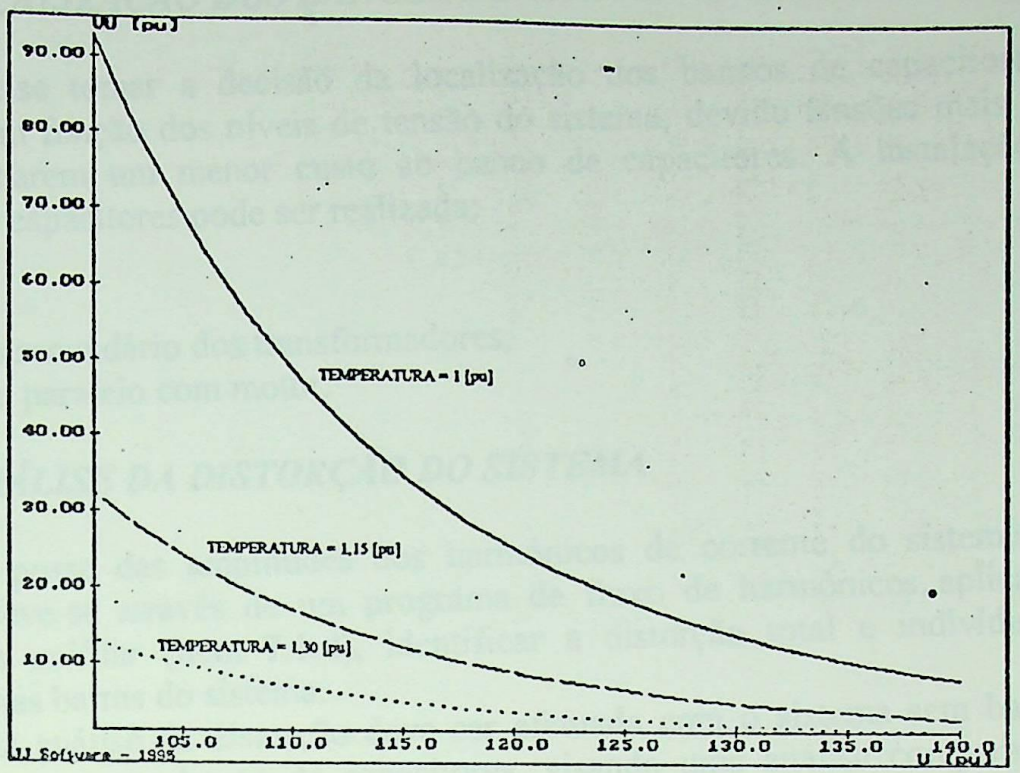


FIGURA 19- GRÁFICO DA VIDA ÚTIL EM FUNÇÃO DA TENSÃO APLICADA

Estes dados coletados devem ser os mais precisos e detalhados possíveis, para que se possa evitar ao máximo uma análise incorreta. No anexo 19 apresenta-se um sistema com uma relação dos dados necessários mínimos.

7.1.b- *MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS*

A medição dos harmônicos têm como objetivo detectar os harmônicos de corrente e tensão presentes no sistema. Com isso determinar os valores de distorção do sistema e as amplitudes de cada harmônico. Deve-se fazer esta medição o mais próximo possível da carga eléctrica especial. O tempo de duração desta medição depende das características da CEE.

7.1.c- *ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA*

Está análise permite obter o comportamento global do fator de potência nos últimos meses, para se ter uma ideia de situação atual e a partir daí tem-se uma definição da potência dos bancos de capacitores necessário para corrigir o fator de potência ao nível desejado. No anexo 20 tem-se um conta de energia típica de um sistema industrial.

7.1.d - *OBTENÇÃO DO DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA*

A partir dos dados coletados do sistema do item 7.1.a, deve-se montar o diagrama unifilar do sistema elétrico, sendo que os elementos que compõe o sistema elétrico, serão representados em nossa análise, por resistências, indutâncias e capacitâncias.

7.1.e- *LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES*

Deve-se tomar a decisão da localização dos bancos de capacitores no sistema, em função dos níveis de tensão do sistema, devido tensões mais baixa proporcionarem um menor custo ao banco de capacitores. A instalação dos bancos de capacitores pode ser realizada:

- No secundário dos transformadores;
- Em paralelo com motor.

7.1.f- *ANÁLISE DA DISTORÇÃO DO SISTEMA*

De posse das amplitudes dos harmônicos de corrente do sistema (item 7.1.b), deve-se através de um programa de fluxo de harmônicos aplicado ao diagrama unifilar (item 7.1.d), identificar a distorção total e individual das tensões nas barras do sistema.

Esta análise da distorção deve ser efetuada com o sistema sem banco de capacitores e com banco de capacitores, visando uma análise comparativa da distorção da tensão no sistema elétrico procurando-se simular as situações antes e após a colocação dos bancos de capacitores.

Nesta etapa deve-se observar a ocorrência de ressonância paralela.

7.1.g- *PROJETO DE BANCO DE CAPACITORES*

Após conhecida as distorções do sistema, passa-se a procurar uma tensão e potência nominal para o banco de capacitores, que deverá suportar sem problemas os harmônicos de corrente do sistema sem provocar perda de vida útil da unidade capacitiva.

A determinação U_{BCN} (tensão nominal do banco de capacitores) e Q_{BCN} (potência nominal do banco de capacitores) é iniciada pela colocação do banco de capacitores no sistema e executando um programa de fluxo de harmônicos (FH) para a determinação das amplitudes dos harmônicos de corrente através do banco de capacitores. De posse das amplitudes desses harmônicos determina-se os valores iniciais da tensão (U_{BC}) e potência (Q_{BC}) do banco de capacitores.

De posse dos valores de U_{BC} e Q_{BC}, determina-se, preliminarmente os valores do reator, que em conjunto com o banco de capacitores formará o "filtro básico", pois o mesmo foi calculado através dos valores dos harmônicos de corrente absorvidos pelo banco de capacitores sem o reator, que certamente é de maior amplitude que os harmônicos absorvidos pelo filtro básico, isto devido a presença do reator em série com o banco. Nota-se que quanto maior os valores dos harmônicos de correntes que atravessam o banco de capacitores maior será o valor da tensão do banco para que o mesmo suporte os harmônicos de corrente e deixe a disposição da rede eléctrica a potência reativa necessária a correção do fator de potência do sistema. A simulação do sistema apresentado na figura 20 (ver anexo 21), mostra que as correntes com o banco de capacitores sem o reator em série são maiores que com o reator (filtro).

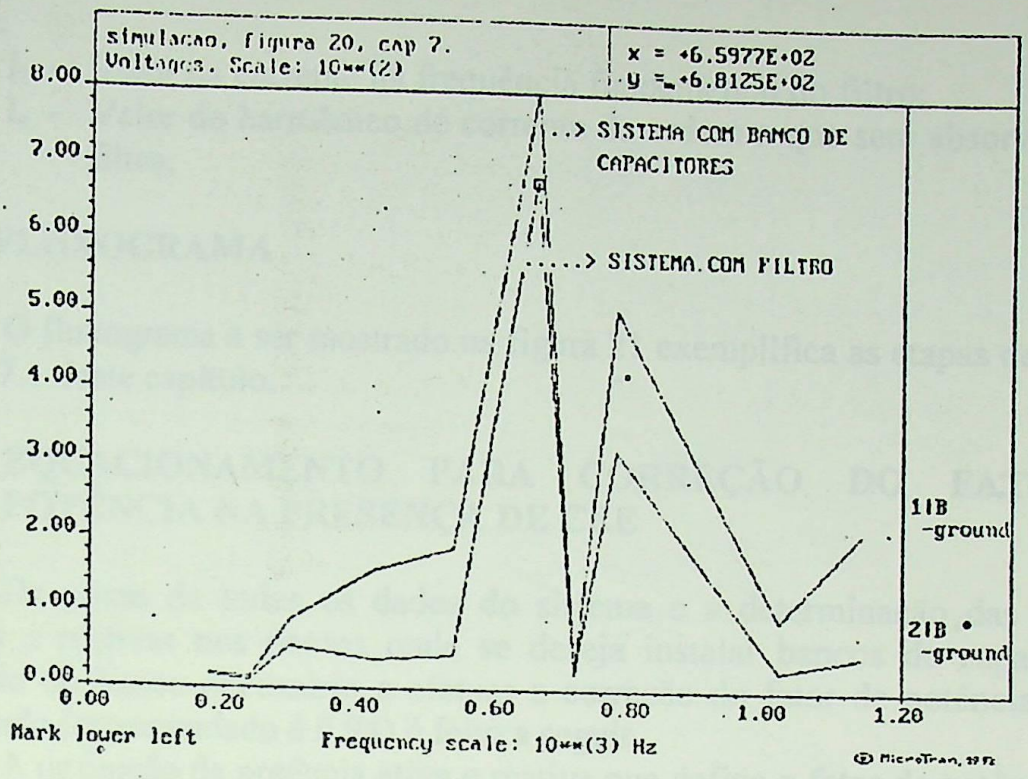


FIGURA 20- ESPECTRO DAS TENSÕES NO BANCO DE CAPACITORES COM E SEM REATOR EM SÉRIE

Após escolher os valores do banco de capacitores e reator, que compõe o filtro básico, deve-se executar um fluxo de harmônicos (FH) para determinar as novas amplitudes dos harmônicos de corrente no banco de capacitores.

Executando o fluxo de harmônicos com o filtro básico, obtém-se um novo valor de corrente que percorre o banco de capacitores. De posse dessa nova corrente, calcular-se o novo valor de U_{BC} e Q_{BC}, na qual não é adequado para especificar o banco de capacitores de um filtro, falta ainda ajustar esses valores aos capacitores preferencialmente, disponível em mercado que comporão o banco de capacitores, esses capacitores associados em paralelo e em série definem uma tensão U_{BCN} e a potência Q_{BCN}. Os valores de U_{BCN} e Q_{BCN} deverão ser maiores ou iguais a U_{BC} e Q_{BC}.

7.1.1- ESPECIFICAÇÃO

De posse dos valores U_{BCN} e Q_{BCN} do banco de capacitores devemos especificar a proteção e o tipo de chaveamento do filtro. O tipo de conexão utilizada na montagem do filtro na prática é a conexão de capacitores estrela ou dupla/estrela-isolada, com a proteção entre o neutro-terra para conexões estrela e entre neutros para dupla-estrela. Esta forma de conexão permite fácil monitoriamente de desequilíbrio de neutro (indicação de desequilíbrio entre bancos ou entre fases).

A corrente eficaz que passará no reator para especificá-lo é dado pela equação 20.

$$I_{RMS} \geq I_1 + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \qquad (20)$$

onde:

I_1 - Valor da corrente na frequência fundamental do filtro;
I_n - Valor do harmônico de corrente de ordem n que será absorvida pelo o filtro.

7.2- FLUXOGRAMA

O fluxograma a ser mostrado na figura 21 exemplifica as etapas descritas no item 7.1 deste capítulo.

7.3- EQUACIONAMENTO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE CEE

De posse de todos os dados do sistema e a determinação das potências ativas e reativas nos pontos onde se deseja instalar bancos de capacitores, o calculo do banco necessário a efetuar a correção do fator de potência ao valor desejado (recomendado é 0,94) é feito a seguir.

A definição da potência ativa e reativa que define o fator de potência é feita da seguinte forma.

$$FP_A = \cos\left[tg^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right)\right] \qquad (21)$$

onde:

Q - Potência reativa;
P - Potência ativa;
FP_A - Fator de potência atual (original);

A potência reativa necessária para corrigir o fator de potência de modo a atingir o valor desejado pode ser dado pela equação 22:

$$Q_1 = P\left(tg\left(\cos^{-1}(FP_A)\right) - tg\left(\cos^{-1}(FP_D)\right)\right) \qquad (22)$$

onde:

Q_1 - Potência reativa necessária a correção do fator de potência na frequência industrial;
FD_D - Fator de potência desejado (a ser corrigido).

Para impedir uma ressonância paralela com a impedância do sistema para os harmônicos de corrente, pode-se colocar um indutor de bloqueio em série com o banco de capacitores de modo a produzir uma ressonância série para os harmônicos de mais baixa ordem.

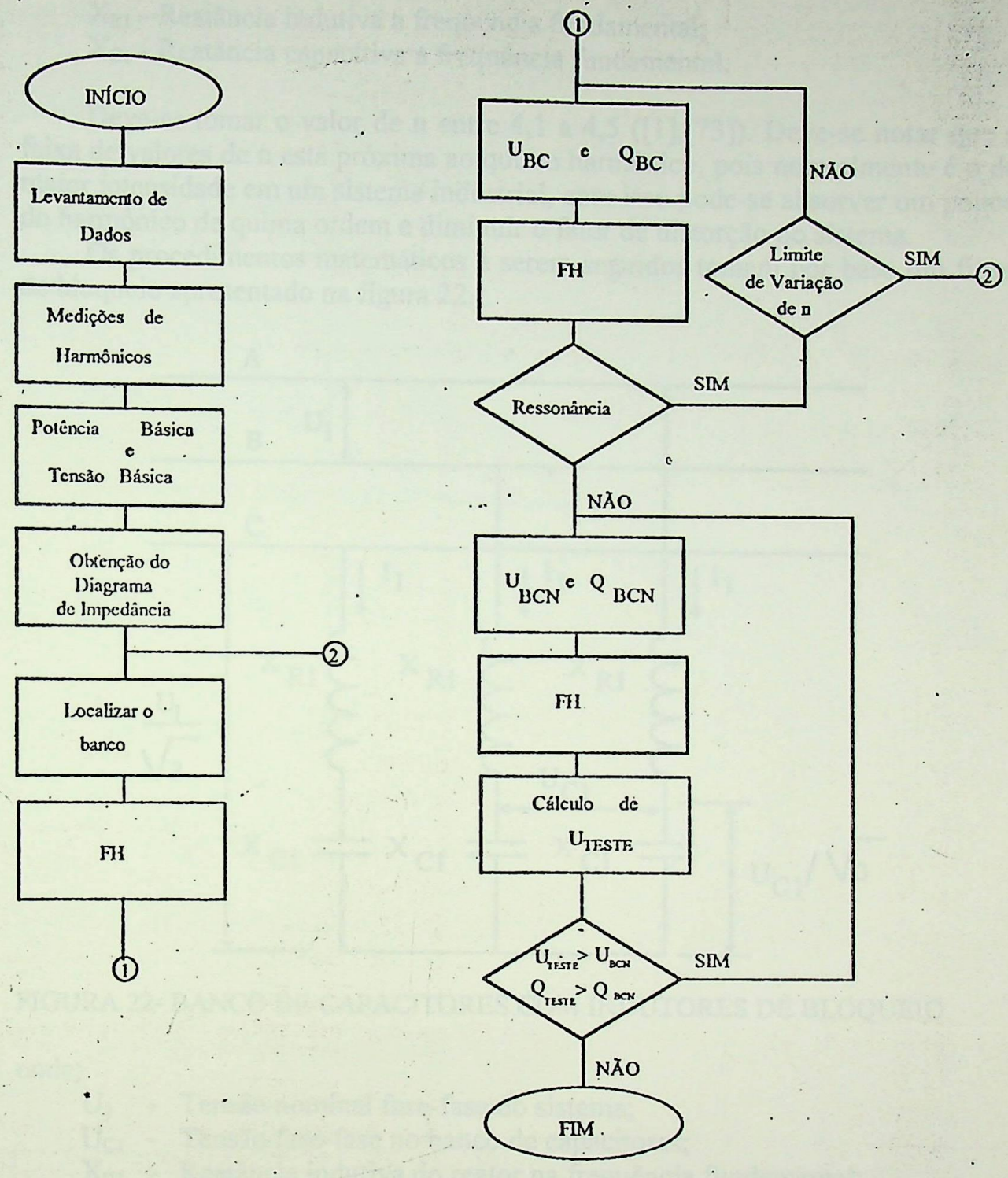


FIGURA 21- FLUXOGRAMA MOSTRANDO O PROCEDIMENTO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS

Para produzir uma ressonância em uma frequência n vezes superior a fundamental, deve-se:

$$X_{RI} = \frac{X_{CI}}{n^2} \qquad (23)$$

onde:

X_{R1} - Reatância indutiva a frequência fundamental;
X_{C1} - Reatância capacitiva a frequência fundamental.

Deve-se tomar o valor de n entre 4,1 a 4,5 ([1],[73]). Deve-se notar que a faixa de valores de n está próxima ao quinto harmônico, pois normalmente é o de maior intensidade em um sistema industrial, com isso pode-se absorver um pouco do harmônico de quinta ordem e diminuir o fator de distorção do sistema.

Os procedimentos matemáticos a serem seguidos tomam por base um filtro de bloqueio apresentado na figura 22.

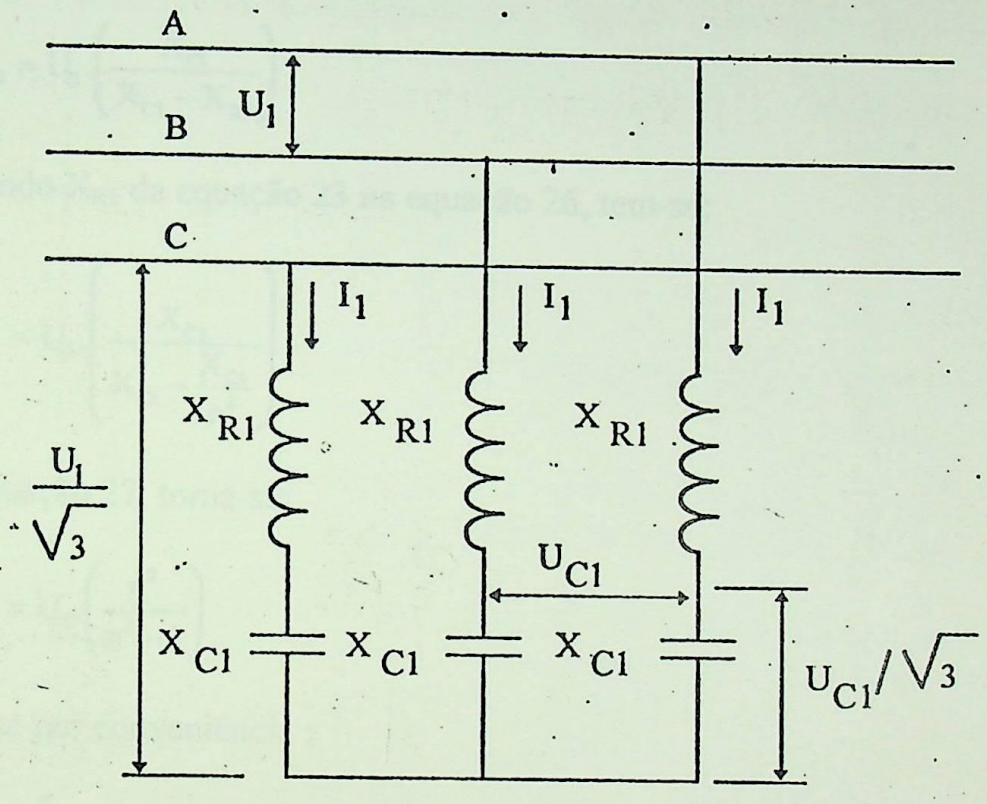


FIGURA 22- BANCO DE CAPACITORES COM INDUTORES DE BLOQUEIO

onde;

U_1 - Tensão nominal fase-fase do sistema;
U_{C1} - Tensão fase-fase no banco de capacitores;
X_{R1} - Reatância indutiva do reator na frequência fundamental;
X_{C1} - Reatância capacitiva do banco de capacitores na frequência fundamental;
I_1 - Corrente no filtro na frequência fundamental.

Quando um reator fica em série com um banco de capacitores, o banco de capacitores fica submetido a uma tensão acima do valor da tensão do sistema na qual este está aplicado, este valor de tensão varia de acordo com o harmônico o qual o filtro está sintonizado e é inversamente proporcional a ordem do harmônico.

A Corrente I_1 no ramo do filtro pode ser calculada da seguinte forma:

$$I_1 = \frac{U_1/\sqrt{3}}{X_{R1} - X_{C1}} \tag{24}$$

assim tem-se:

$$U_{C1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}\left(\frac{X_{C1}}{X_{C1} - X_{R1}}\right) \tag{25}$$

logo:

$$U_{C1} = U_1 \cdot \left(\frac{X_{C1}}{X_{C1} - X_{R1}}\right) \tag{26}$$

substituindo X_{R1} da equação 23 na equação 26, tem-se:

$$U_{C1} = U_1 \cdot \left(\frac{X_{C1}}{X_{C1} - \frac{X_{C1}}{n^2}}\right) \tag{27}$$

logo a equação 27, torna-se:

$$U_{C1} = U_1 \cdot \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) \tag{28}$$

fazendo-se por conveniência :

$$a = \frac{n^2}{n^2 - 1} \tag{29}$$

tem-se:

$$U_{C1} = a.U_1 \tag{30}$$

Assim conclui-se que os indutores em série com os bancos de capacitores provocam uma elevação de tensão nos terminais dos mesmos.

A figura 24 mostra a resposta de uma simulação na qual a tensão eficaz na frequência fundamental é de 1 [pu] (o gráfico da figura mostra a resultado em valores de pico - ver anexo 21), o filtro está sintonizado para o terceiro harmônico, portanto o valor da tensão que deverá está submetido o banco de capacitores é de:

$$U_{C1} = 1.\frac{3^2}{3^2 - 1} = 1{,}125 \text{ [pu]}$$

A resposta da simulação está contida na figura 23, onde a tensão no banco de capacitores é dado por B2.

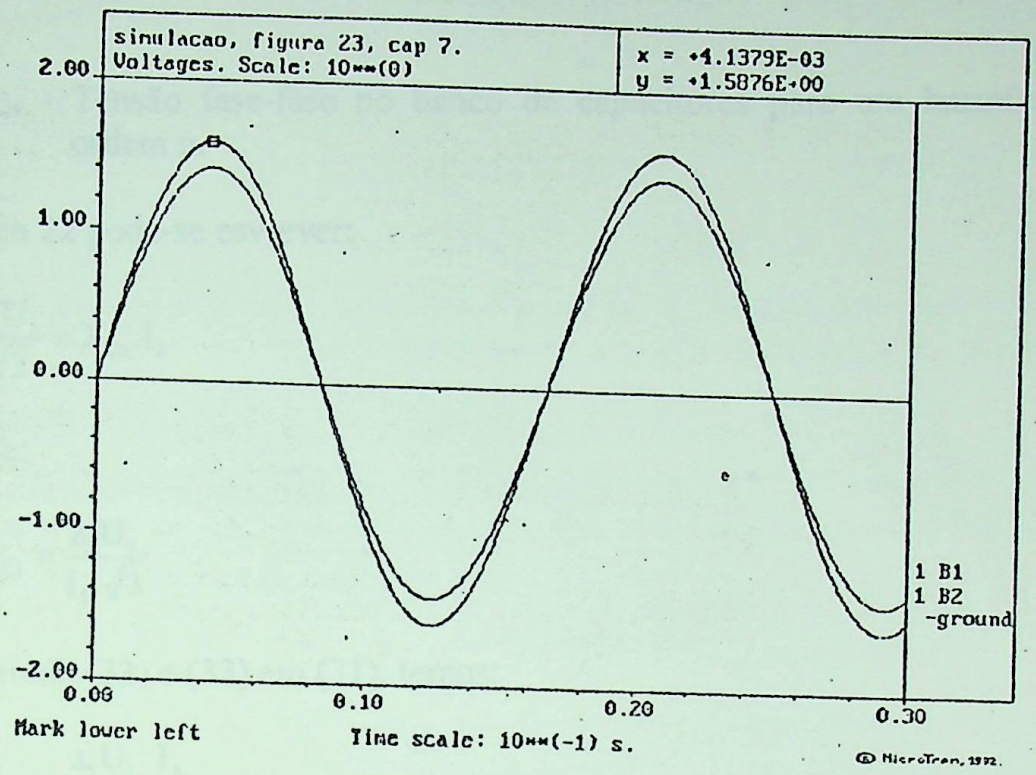


FIGURA 23- SIMULAÇÃO MOSTRANDO O PROBLEMA DA TENSÃO NO BANCO DE CAPACITORES DE UM FILTRO

A figura 24 mostra um gráfico do valor da variação da tensão no banco de capacitores de acordo com a ordem do harmônico para o qual o filtro está sintonizado.

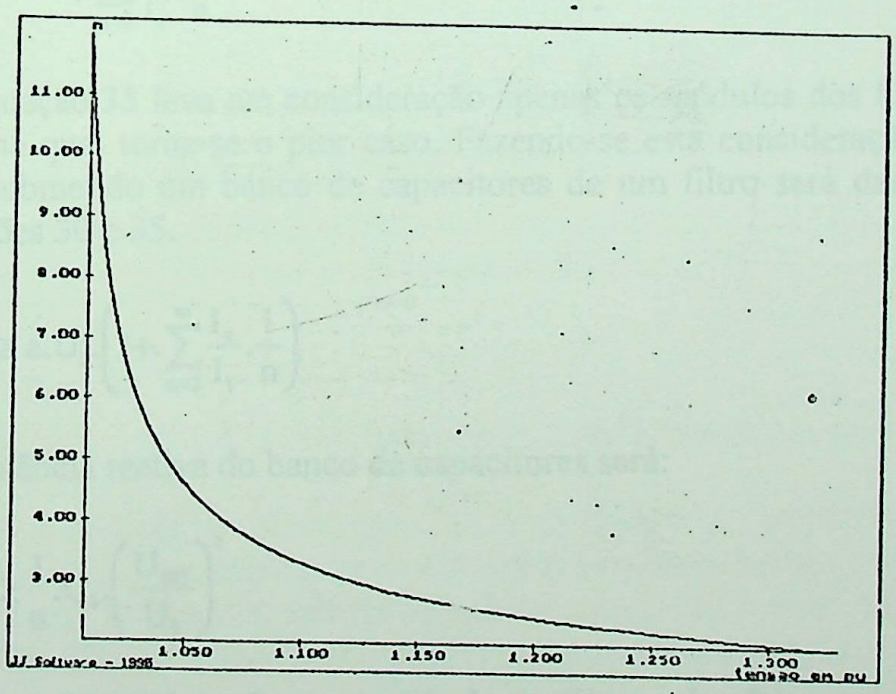


FIGURA 24- TENSÃO NO BANCO DE CAPACITORES DO FILTRO COM RELAÇÃO AOS HARMÔNICOS (CONSIDERANDO A FONTE DE TENSÃO APLICADA AO FILTRO NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL DE 1 [pu])

Da figura 22, para o harmônico de ordem n tem-se:

$$\frac{U_{Cn}}{\sqrt{3}} = \frac{X_{C1}}{n}.I_n \qquad (31)$$

onde:

U_{Cn} - Tensão fase-fase no banco de capacitores para um harmônico de ordem n.

Da figura 22 pode-se esvrever:

$$\frac{a.U_1}{\sqrt{3}} = X_{C1}.I_1 \qquad (32)$$

ou ainda:

$$X_{C1} = \frac{a.U_1}{I_1.\sqrt{3}} \qquad (33)$$

substituindo (32) e (33) em (31), temos:

$$U_{Cn} = \frac{a.U_1}{n}.\frac{I_n}{I_1} \qquad (34)$$

A equação 34 foi elaborada para apenas um harmônico, já para n harmônicos tem-se:

$$U_{Cn} = a.U_1.\sum_{n=2}^{\infty}\frac{I_n}{I_1}.\frac{1}{n} \qquad (35)$$

A equação 35 leva em consideração apenas os módulos dos harmônicos de corrente, na qual torna-se o pior caso. Fazendo-se esta consideração, a tensão a que fica submetido um banco de capacitores de um filtro será dado pela soma das equações 30 e 35.

$$U_{BC} \geq a.U_1.\left(1+.\sum_{n=2}^{\infty}\frac{I_n}{I_1}.\frac{1}{n}\right) \qquad (36)$$

A potência reativa do banco de capacitores será:

$$Q_{BC} \geq \frac{1}{a}.Q_1.\left(\frac{U_{BC}}{U_1}\right)^2 \qquad (37)$$

Utilizando-se U_{BC} e Q_{BC} e através dos catálogos dos fabricantes de banco de capacitores, encontra-se os valores nominais do banco U_{BCN} e Q_{BCN}.

Logo a reatância do banco de capacitores será dado pela equação 38.

$$X_{C1} = \frac{U_{BCN}^2}{Q_{BCN}} \tag{38}$$

A reatância dos indutores de bloqueio será:

$$X_{R1} = \frac{X_{C1}}{n^2} \tag{39}$$

7.4- EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS

Considere como exemplo o sistema apresentado na figura 17.

As amplitudes dos harmônicos de corrente imposto pelas duas CEE especiais está mostrado na tabela 2.

ORDEM DOS HARMÔNICOS	AMPLITUDE DOS HARMÔNICOS [A] (RMS)
3	11,2
4	5,00
5	23,2
7	11,2
9	10,44
11	127,8
12	4,64
13	81,2
17	11,2
19	23,2

...eral de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
BIM
de Irajubá - EFEI

TABELA 2- AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE NA CEE DA FIGURA 17

Deve-se montar o diagrama unifilar do sistema em questão, a figura 25 mostra o diagrama.

Para o diagrama da figura 25, desprezou-se as impedâncias do cabo, as resistências dos transformadores e gerador por considerarmos desprezíveis neste caso. Neste caso, o sistema foi simulado com a carga com motores, devido ser uma impedância muito elevada com relação ao restante do sistema.

De posse do diagrama unifilar e a potência de curto da concessionária, fluxo harmônicos para a obtenção da distorção individual e total do sistema fornece o resultado mostrado na figura 26 (ver anexo 22).

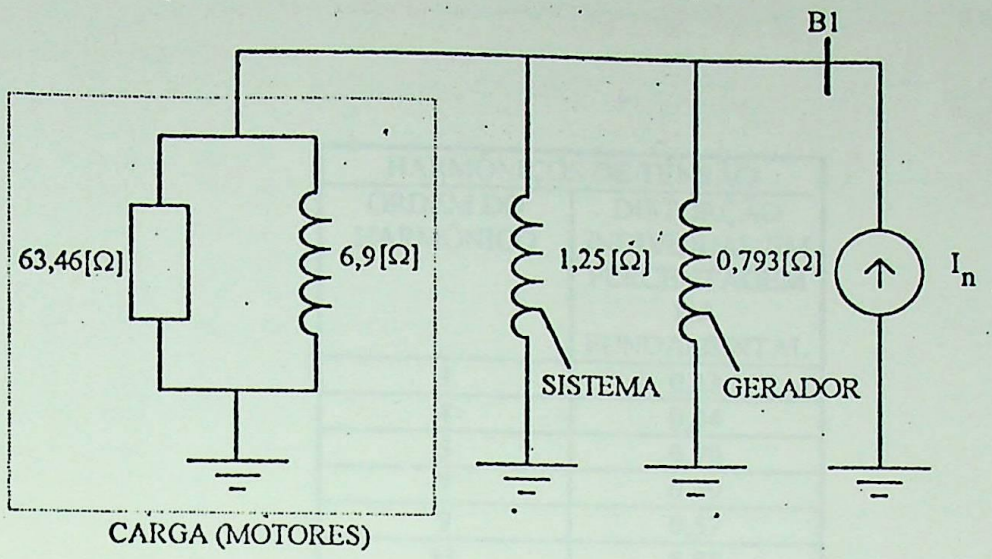


FIGURA 25- DIAGRAMA UNIFILAR REPRESENTANDO A FIGURA 17.

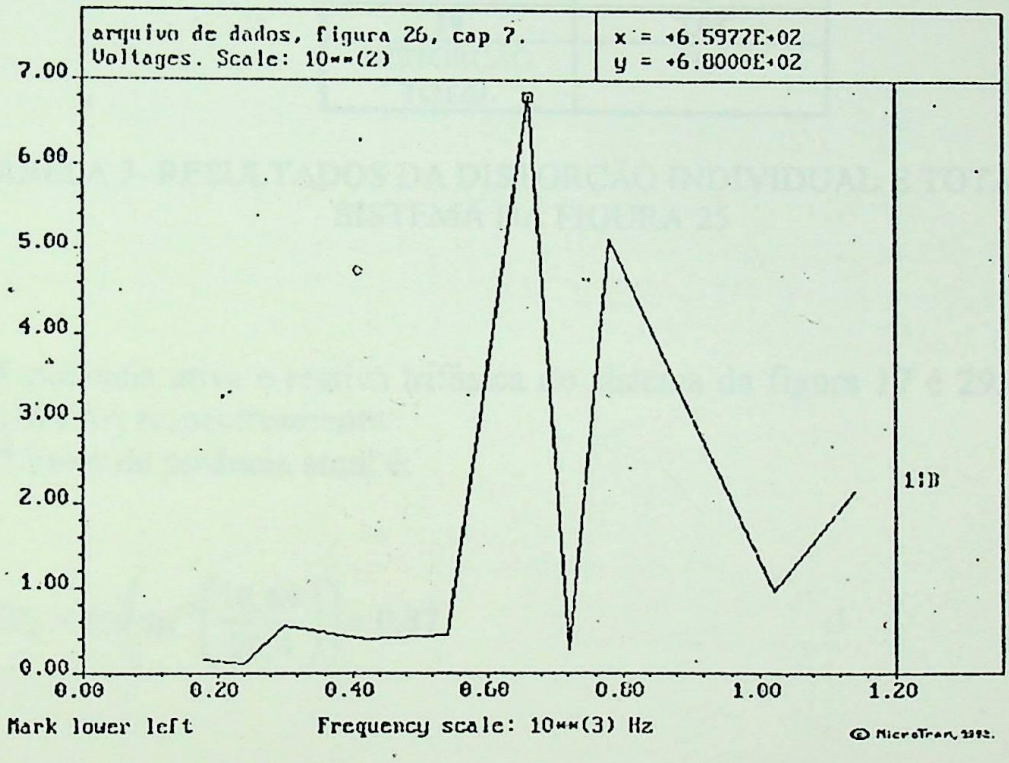


FIGURA 26- ESPECTRO DOS HARMÔNICOS DE TENSÃO DO DIAGRAMA DA FIGURA 25

O fator de distorção individual e total é mostrado com o uso das equações 40 e 41 respectivamente, o resultado para o exemplo é mostrado na tabela 3.

$$FDu_n\% = \frac{U_n}{U_1}.100 \qquad (40)$$

$$FDu\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \qquad (41)$$

HARMÔNICOS DE TENSÃO	
ORDEM DO HARMÔNICO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
3	0,21
4	0,14
5	0,70
7	0,49
9	0,57
11	8,55
12	0,34
13	6,43
17	1,2
19	2,68
DISTORÇÃO TOTAL	11,0

TABELA 3- RESULTADOS DA DISTORÇÃO INDIVIDUAL E TOTAL DO SISTEMA DA FIGURA 25

A potência ativa e reativa trifásica do sistema da figura 17 é 29,4 [MW] e 16,64 [MVAr] respectivamente.

O Fator de potência atual é:

$$FP_A = \cos\left(tg^{-1}\left(\frac{16,64}{29,4}\right)\right) = 0,87$$

Deseja-se elevar o fator de potência par 0,94, logo a potência reativa do banco será:

$$Q_1 = 29,4\left(tg\left(\cos^{-1}(0,87)\right) - tg\left(\cos^{-1}(0,94)\right)\right)$$

$$Q_1 = 6 \text{ [MVAr]}$$

Inserindo-se o banco de capacitores no sistema da figura 25 e executando um fluxo de harmônicos, foi observado que não ocorreu problema de ressonância entre o banco e o sistema, apenas uma alteração variável (variação maior ou menor) nas distorções individuais, enquanto um aumento do fator de distorção total da tensão foi observado. A tabela 4 mostra os resultados do fator de distorção individual e total da tensão (ver anexo 23).

HARMÔNICOS DE TENSÃO	
ORDEM DO HARMÔNICO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
3	0,24
4	0,18
5	1,14
7	1,98
9	2,37
11	10,02
12	0,28
13	4,04
17	0,35
19	0,59
DISTORÇÃO TOTAL	11,4 %

TABELA 4- DISTORÇÃO INDIVIDUAL E TOTAL PARA O HARMÔNICO DE TENSÃO PARA O CASO DO SISTEMA COM BANCO DE CAPACITORES

Com a inserção do banco de capacitores no sistema, obtemos os harmônicos de corrente absorvidos pelo mesmo. Este harmônicos de correntes são a base para a determinação do banco de capacitores básico do filtro para a correção do fator de potência. A tabela 5 mostra as amplitudes destes harmônicos (ver anexo 24).

HARMÔNICOS DE CORRENTE	
ORDEM DO HARMÔNICO	AMPLITUDE DO HARMÔNICOS EM AMPERES[A]
3	1,85
4	1,88
5	14,3
7	34,9
9	53,7
11	276
12	8,48
13	132,2
17	14,9
19	28,3

TABELA 5- AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE PARA O CASO DO BANCO DE CAPACITORES NO SISTEMA

A corrente na componente fundamental do banco de capacitores é:

$$I_1 = \frac{6}{\sqrt{3}.13,8} = 251\ [A]$$

Para esta instalação n = 4,1.

$$a = \frac{4,1^2}{4,1^2 - 1} = 1,0633$$

Considerando a equação 36, a tensão que o banco de capacitores deverá possuir será:

$$U_{BC} = 1,0633.13,8\left[1 + \frac{1,85}{251}.\frac{1}{3} + \frac{1,88}{251}.\frac{1}{4} + \frac{14,3}{251}.\frac{1}{5} + \frac{34,5}{251}.\frac{1}{7} + \frac{53,7}{251}.\frac{1}{9} + \frac{276}{251}.\frac{1}{11} + \frac{8,48}{251}.\frac{1}{12} + \frac{132}{251}.\frac{1}{13} + \frac{149}{251}.\frac{1}{17} + \frac{28,3}{251}.\frac{1}{19}\right]$$

$$U_{BC} = 1,0633.13,8[1 + 0,212]$$

$$U_{BC} = 17,78\ [kV]$$

Com o uso da equação 37, temos que a potência reativa nesta nova tensão será:

$$Q_{BC} = \frac{1}{1,0633}.6.\left(\frac{17,78}{9,36}\right)^2$$

$$Q_{BC} = 9,36\ [MVAr]$$

Usando-se a equação 38, podemos encontrar o valor da reatância capacitiva do filtro:

$$X_{C1} = \frac{17,78^2}{9,36} = 33,77\ [\Omega],$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.60.33,77}$$

$$C = 78,53\ [\mu F]$$

Através da equação 39, encontraremos a reatância indutiva do reator do filtro.

$$X_{R1} = \frac{33,77}{4,1^2} = 2,008\ [\Omega],$$

$$L = \frac{2,008}{2.\pi.60} = 5,32\ [mH]$$

De posse das reatâncias indutiva e capacitiva, encontraremos um filtro (filtro básico) que deverá ser inserido no diagrama da figura 25, assim determinaremos os harmônicos de corrente absorvidos pelo filtro básico, para a sua especificação final.

Novamente utilizando-se um programa de fluxo de harmônicos, temos que, os harmônicos de corrente absorvidos pelo filtro básico é mostrado na tabela 6 (ver anexo 24).

HARMÔNICOS DE CORRENTE	
ORDEM DO HARMÔNICO	AMPLITUDE DO HARMÔNICOS EM [A]
3	4,46
4	7,28
5	9,87
7	3,12
9	2,44
11	28,0
12	0,99
13	17,2
17	2,37
19	4,70

TABELA 6- AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE PARA O CASO DO FILTRO BÁSICO

Com os valores dos harmônicos de corrente absorvidos pelo filtro básico, e reutilizando-se a equação 36 para o cálculo da tensão do banco de capacitores, temos:

$$U_{BC} = 15,27 \text{ [kV]}$$

e através da equação 37 e utilizando-se o valor de U_{BC}, o valor de Q_{BC} será:

$$Q_{BC} = \frac{1}{1,0633}.6.\left(\frac{15,27}{13,8}\right)^2$$

$$Q_{BC} = 6,9 \text{ [MVAr]}$$

Com a tensão básica (U_{BC}), encontraremos uma tensão nominal do banco de capacitores (U_{BCN}). Deve-se chamar a atenção que para o caso de filtro, não existem unidades capacitivas com valores de tensão e potência fixo, mas esta tensão e potência não devem ser valores quebrados, logo a tensão U_{BCN} para este caso será dado por dois grupos de capacitores em série por fase, sendo a tensão de cada unidade capacitiva 4,5 [kV].

$$U_{BCN} = \sqrt{3}.2.4,5 = 15,58 \text{ [kV]}$$

já, a potência nominal do banco de capacitores será:

Q_{BCN} = 2. 3. 2. 8. 72 = 6,912 [MVAr]

- 72 → POTÊNCIA DA UNIDADE CAPACITIVA [KVAr]
- 8 → CAPACITORES EM PARALELO
- 2 → CAPACITORES EM SÉRIE
- 3 → SISTEMA TRIFÁSICO
- 2 → DUPLA-ESTRELA

O valor da reatância capacitiva do banco e da reatância indutiva do reator do filtro é dada pela a equação 38 e 39 respectivamente.

$$X_{C1} = \frac{15,58^2}{6,912} = 35,11\ [\Omega]$$

$$X_{R1} = \frac{35,11}{4,1^2} = 2,088\ [\Omega]$$

Executando-se novamente o programa de fluxo de harmônicos com o filtro nominal no diagrama da figura 26, obtêm-se na tabela 7 os seguintes harmônicos de corrente (ver anexo 25).

HARMÔNICOS DE CORRENTE	
ORDEM DO HARMÔNICO	AMPLITUDE DO HARMÔNICOS EM AMPERES [A]
3	4,23
4	7,29
5	9,26
7	3,03
9	2,37
11	27,1
12	0,96
13	16,7
17	2,29
19	4,55

TABELA 7- AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE PARA O CASO DO FILTRO NOMINAL

Com os valores dos harmônicos de corrente da tabela 7 e, utilizando-se as equações 36 e 37, encontraremos um valor de tensão e potência (U_{TESTE} e

Q_{TESTE}), na qual tem que ser menor ou igual a tensão e a potência nominal especificada para o filtro.

$$U_{TESTE} = 15,28 \text{ [kV]}$$

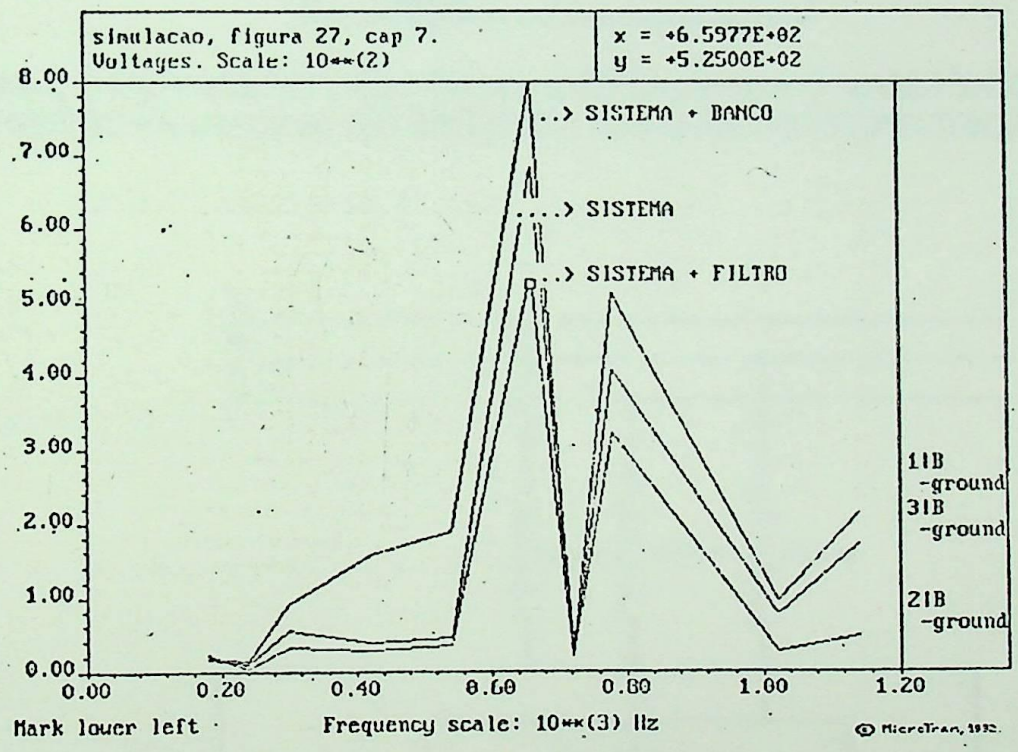
$$Q_{TESTE} = \frac{1}{1,0633}.6.\left(\frac{15,28}{13,8}\right)^2$$

$$Q_{TESTE} = 6,91 \text{ [MVAr]}$$

O filtro projetado foi aceito, pois temos que a tensão e a potência de teste ficou abaixo dos valores nominais (U_{BCN} e Q_{BCN}).

Vale ressaltar que caso $U_{TESTE} > U_{BCN}$ ou $Q_{TESTE} > Q_{BCN}$ teríamos que recalcular os valores de U_{BCN} e Q_{BCN}.

A figura 27 ilustra uma comparação do espectro dos harmônicos de tensão para o caso sem banco, com banco e com filtro nominal para correção do fator de potência.



Biblioteca MAUÁ BIM

FIGURA 27- ESPECTROS COMPARATIVO DOS HARMÔNICOS DE TENSÃO DO SISTEMA PARA O CASO DO SISTEMA ORIGINAL, COM BANCO E FILTRO ESPECIFICADO

O fator de distorção individual e total da tensão com a colocação do filtro especificado é mostrado na tabela 8.

Como mostrado o método providenciou a inserção do banco de capacitores no sistema para a correção do fator de potência possuindo harmônicos de corrente, diminuiu ainda o fator de distorção total da forma de onda da tensão, vale lembra que este filtro não têm objetivo de reduzir a distorção do

sistema e sim melhorar o fator de potência. O filtro então pode ser mostrado simplificamente na figura 28.

HARMÔNICOS DE TENSÃO	
ORDEM DO HARMÔNICO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
3	0,28
4	0,04
5	0,41
7	0,36
9	0,44
11	6,70
12	0,26
13	5,10
17	0,96
19	2,15
DISTORÇÃO TOTAL	8,8

TABELA 8- DISTORÇÃO INDIVIDUAL E TOTAL PARA O HARMÔNICO DE TENSÃO PARA O CASO DO SISTEMA COM O FILTRO ESPECIFICADO

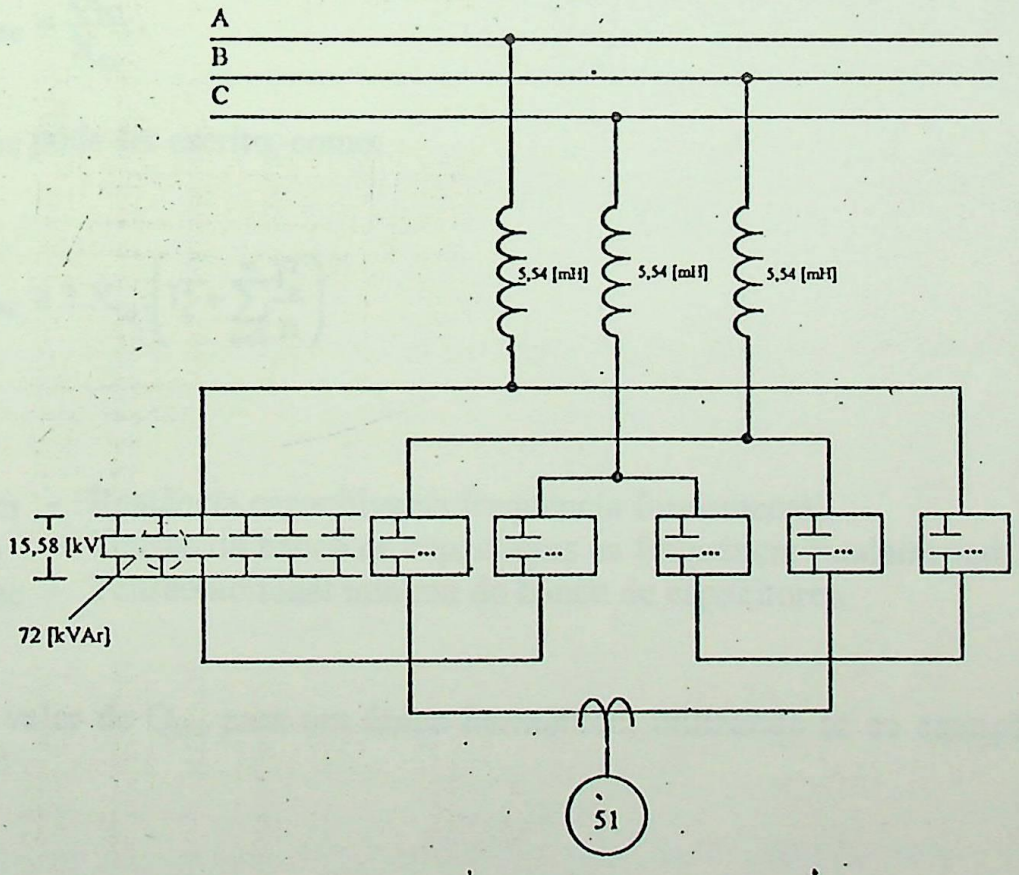


FIGURA 28- DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES QUE COMPÕEM O FILTRO ESPECIFICADO

8- PROJETO BÁSICO DE FILTRO PARA ABSORÇÃO DE HARMÔNICOS DE CORRENTE

Este item, está voltado para a determinação das equações que definem o filtro para absorção dos harmônicos de corrente. De acordo com a figura 22. A potência total do banco de capacitores será dada pela equação 42 se for considerado apenas um harmônico de corrente pelo filtro.

$$Q_{BC} \geq Q_1 + Q_n \tag{42}$$

onde:

Q_{BC} - Potência reativa mínima do banco de capacitores;
Q_1 - Potência reativa na frequência fundamental;
Q_n - Potência reativa devido aos harmônicos.

sabendo-se que:

$$Q_1 = a^2 . \frac{U_1^2}{X_{C1}} \tag{43}$$

$$Q_n = 3.X_{C1} . \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{n} \tag{44}$$

$$Q_{BC} = \frac{U_{BC}^2}{X_{C1}} \tag{45}$$

logo Q_{BC} pode ser escrito, como:

$$Q_{BC} \geq 3.X_{C1} . \left(I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{n} \right) \tag{46}$$

onde:

X_{C1} - Reatância capacitiva na frequência fundamental;
U_1 - Tensão do banco de capacitores na frequência fundamental;
U_{BC} - Tensão nominal mínima do banco de capacitores.

O valor de Q_{BC} para um único harmônico, utilizando se as equações 43 e 44, será:

$$Q_{BC} \geq a^2 . \frac{U_1^2}{X_{C1}} + 3.I_n^2 . \frac{X_{C1}}{n} \tag{47}$$

e substituindo a equação 45 na equação 47, tem-se:

$$\frac{U_{BC}^2}{X_{C1}} \geq a^2 . \frac{U_1^2}{X_{C1}} + 3.I_n^2 . \frac{X_{C1}}{n} \qquad (48)$$

Fazendo-se:

$$\xi = \frac{U_{BC}}{U_1} \qquad (49)$$

onde:

ξ- Relação entre uma tensão especificada para o banco de capacitores e a tensão na frequência fundamental do sistema.

tem-se:

$$X_{C1} = \frac{U_1}{I_n} . \sqrt{\frac{n.(\xi^2 - a^2)}{3}} \qquad (50)$$

Substituindo a equação 43 em 50, obtém-se a potência reativa mínima na frequência fundamental considerando-se a presença de um harmônico de ordem n.

$$Q_1 = I_n . U_1 . a^2 \sqrt{\frac{3}{n(\xi^2 - a^2)}} \qquad (51)$$

já, substituindo a equação 44 na equação 50, a potência reativa devido aos harmônicos será dada por:

$$Q_n = I_n . U_1 \sqrt{\frac{3.(\xi^2 - a^2)}{n}} \qquad (52)$$

então, a potência reativa total será:

$$Q_T = I_n . U_1 . \xi^2 \sqrt{\frac{3}{n(\xi^2 - a^2)}} \qquad (53)$$

A partir da equação 53, pode-se levantar curvas que forneçam o valor da potência reativa para cada harmônico de ordem n em função de ξ. Esta curva é mostrada na figura 29, para I_n=1[pu] e U_1=1[pu] [1].

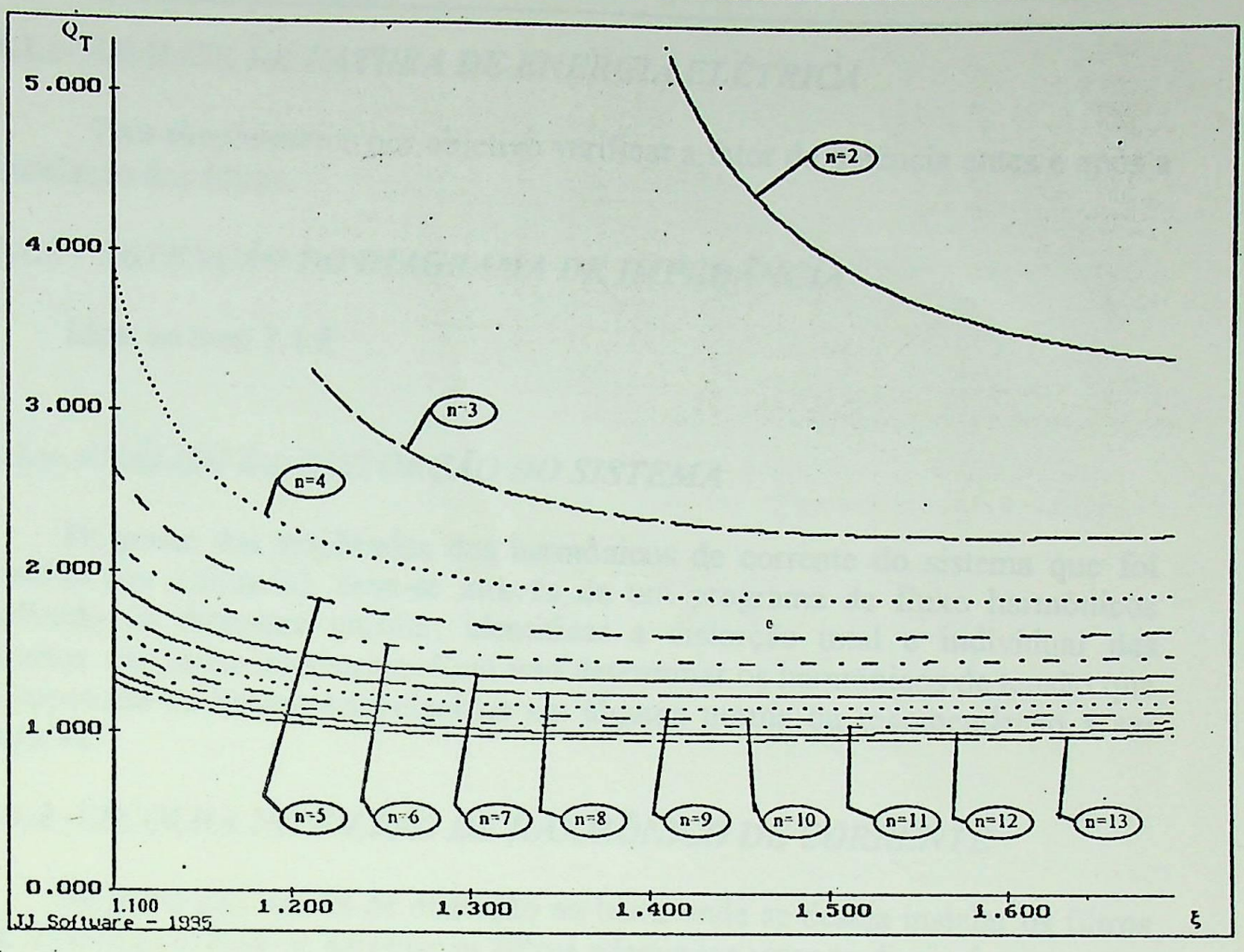


FIGURA 29- CURVAS DA POTÊNCIA REATIVA DEVIDO AO HARMÔNICO DE ORDEM n EM FUNÇÃO DE ξ [1]

Na figura 29 é observado que existe uma faixa de variação de ξ que provoca uma variação significativa da potência reativa, esta variação é diferente para cada harmônico, de um modo geral e para fins práticos, a faixa de variação compreendida entre 1,1 e 1,4 tem dado bons resultados [1].

8.1- PROCEDIMENTO A DETERMINAÇÃO DO FILTRO PARA ABSORÇÃO DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE

No projeto de filtros de harmônicos de corrente, não existe intenção de melhorar o fator de potência da instalação. As etapas que deverão ser seguidas para o projeto deste tipo de filtros vem-se a seguir.

8.1.a- *LEVANTAMENTO DE DADOS*

O mesmo procedimento do item 7.1.a

8.1.b- *MEDIÇÃO DOS HARMÔNICOS*

O mesmo procedimento do item 7.1.b.

8.1.c- *ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA*

Tem simplesmente por objetivo verificar a fator de potência antes e após a instalação dos filtros.

8.1.d - *OBTENÇÃO DO DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA*

Idem ao item 7.1.d.

8.1.e- *ANÁLISE DA DISTORÇÃO DO SISTEMA*

De posse das amplitudes dos harmônicos de corrente do sistema que foi medido (ou estimado), deve-se através de um programa de fluxo harmônicos aplicado ao diagrama unifilar, identificar a distorção total e individual das tensões nas barras do sistema. Com isso determinar os harmônicos de tensão que ultrapassam os limites estabelecidos em alguma norma ou recomendação a ser seguida.

8.1.d- *ESCOLHA DO FILTRO DE HARMÔNICO DE CORRENTE*

De posse dos limites de distorção na barra onde se deseja instalar os filtros de harmônicos, deve-se escolher os filtros adequados visando diminuir as tensões dos harmônicos na barra desejada.

Analisando-se as distorções individuais do sistema, o primeiro filtro a ser calculado deve ser o que provocou o maior fator de distorção da tensão. Deve-se proceder os cálculos para determinação do filtro adequado, depois executar um programa de fluxo de harmônico no sistema já com o filtro, e novamente calcular o fator de distorção total e individual na barra do sistema e verificar se o nível de distorção diminuiu. Com isso volta-se a procurar o maior fator de distorção, para que se instale o segundo filtro se necessário e assim por diante, até que os níveis de distorção total e individual diminuam aos níveis desejados. Deve-se chamar atenção para o caso da inserção do segundo filtro no programa de fluxo de harmônico, pois não se deve retirar o primeiro filtro do programa, deve-se inserir o primeiro e segundo filtro no sistema, logo a colocação de um novo filtro, deve ser acompanhada da não retirada dos outros filtros calculados anteriormente do programa de fluxo de harmônicos.

Este procedimento pode sofrer modificações, devido a problemas de existir diversas frequências de ressonância. A inserção de um primeiro filtro (maior fator de distorção), pode levar o sistema a sobretensões devido os outros harmônicos de corrente do sistema, ou a colocação do segundo filtro também pode provocar sobretensões, e assim por diante. Deste modo, não é obrigatório seguir a sequência de amplitude dos harmônicos de corrente que provocaram os maiores valores de distorção individual encontrados no sistema. Com isso um sistema pode ter soluções diferentes, devido a isto o método torna-se empírico. Se existir mais de uma solução, a escolha vai depender dos custos/benefícios produzidos por cada configuração encontrada.

8.2- PROCEDIMENTO PARA CALCULAR FILTROS DE HARMÔNICO DE CORRENTE

É proposta uma metodologia de sequência de cálculos para a determinação do filtro adequado a manter os harmônicos de tensão em níveis admissíveis. O procedimento é destinado tanto a filtros sintonizados como amortecidos. A seguir segue-se a sequência para a determinação de um filtro.

Passo 1- Executar o programa de fluxo de harmônico (F.H.) no sistema, para calcular os valores das distorções individuais e total através das equações 40 e 41. De posse deste estudo, procurar o harmônico que provoca o maior fator de distorção individual da tensão na barra onde se deseja instalar o filtro de harmônico.

Passo 2- De posse do valor do harmônico da CEE (I_n) que provocar o maior fator de distorção da tensão, calcula-se a potência reativa mínima na frequência fundamental exigida pelo banco de capacitores para operar sem maiores problemas para um harmônico de ordem n, este banco de capacitores chamaremos de banco de capacitores básico.

Calculando-se o valor de "a" de acordo com a equação 29 e utilizando-se um ξ na qual define a potência reativa na frequência fundamental do filtro (ver equação 51), essa potência reativa deve ser distribuída entre os filtros que se pretende instalar, no caso de mais de um filtro, deve-se tomar o cuidado para não exceder a potência reativa que eleve o fator de potência acima do recomendado, 0,94.

Encontrado a potência do banco de capacitores básico e a tensão básica ($U_{BC}=\xi.U_1$), o filtro básico então pode ser calculado. O valor de X_{C1} do banco de capacitores pode ser dado de acordo com a equação 51.

$$X_{C1} = \frac{(U_{BC})^2}{Q_{BC}} \qquad (54)$$

O valor do reator deve ser o mostrado pela equação 55.

$$X_{R1} = 1,03.\frac{X_{C1}}{n^2} \quad \text{ou} \quad X_{R1} = 0,97.\frac{X_{C1}}{n^2} \qquad (55)$$

Deve-se inicialmente utilizar o fator de qualidade o mais baixo possível (FQ=30).

No caso de filtro amortecido, deve-se colocar um resistor em paralelo com o reator, o valor da resistência é aleatório, tornando-se assim um método empírico.

Passo 3- Executar o programa FH com a inserção do filtro básico. Na execução do programa de fluxo de harmônico, deve-se anotar os valores das correntes que passam pelo filtro. Caso seja um filtro amortecido, adotar uma resistência inicial com produza um baixo fator de qualidade (ver equação 2), vale

lembrar que filtros amortecidos podem possuir qualquer fator de qualidade devido a resistência em paralelo com o reator do filtro, normalmente possuem fatores de qualidade entre 1 a 10.

Passo 4- Calcular o novo valor da potência do banco de capacitores através da equação 51, utilizando-se os resultados do passo 3.

Passo 5- Através da tensão U_{BC} e Q_{BC} encontraremos os valores U_{BCN} e Q_{BCN}, estes valores são dependentes dos números de capacitores em série e paralelo, bem como tipo de conexão, potência dos capacitores monofásicos, etc., da mesma forma que o item 7.1.h.

Passo 6- Recalcular o filtro (com os valores U_{BCN} e Q_{BCN}) através da equações 36 e 46. Este filtro calculado pode se chamado de filtro nominal.

Passo 7- Executar o programa FH com filtro nominal e sistema. Na execução do programa de fluxo de harmônico, deve-se anotar os valores das correntes que passam pelo filtro. Caso seja um filtro amortecido, manter a resistência.

Passo 8- Calcular os valores da distorção total e individual através das equações 40 e 41 e verificar se o filtro reduziu o valor da distorção da tensão do harmônico para o qual o filtro foi projetado. Deve-se observar também o valor da distorção total.

a- Caso a distorção total e individuais da tensão na barra forem abaixo dos níveis desejados, o procedimento para o cálculo dos filtro está encerrado.

b- Caso o nível de distorção da tensão para o qual o filtro foi projetado não atingir os valores desejados ou o fator de distorção total for maior que o desejado, sendo que os níveis de distorção individuais para os outros harmônicos alcançaram os níveis desejados, deve-se retornar ao passo 5 e aumentar o valor de Q_{BCN} ou instalar outros filtros. Deve-se tentar primeiramente aumentar a potência do banco de capacitores.

c- Caso o nível de distorção da tensão para o qual o filtro foi projetado atingir os valores desejados e os níveis de distorção individual para os outros harmônicos não atingirem o nível desejado ou o fator de distorção final for maior que o desejado, projetar outro filtro, normalmente o que produziu no sistema o segundo maior fator de distorção individual do passo 1.

OBSERVAÇÃO: O diagrama do sistema agora será: sistema + filtro(s).

d- Caso seja um filtro amortecido, e os valores de distorção total e individual não atingirem os níveis desejados, alterar a resistência e retornar ao passo 7, deve-se observar o limite do fator de qualidade do filtro amortecido na qual limita o valor da resistência.

Passo 9- Na etapa de verificação, o banco de capacitores deve estar dimensionado corretamente em termos de tensão e potência. Esta verificação no caso da potência (Q_{TESTE}) pode ser feita através da equação 46 e a tensão (U_{TESTE}) pode ser verificada através da equação 36, utilizando-se os harmônicos de correntes absorvidos pelo filtro no passo 7.

O filtro estará aprovado caso:

$$U_{TESTE} \leq U_{BCN}$$
$$E$$
$$Q_{TESTE} \leq Q_{BCN}$$

OBSERVAÇÃO: Caso o sistema necessitar mais de um filtro, a etapa de verificação (passo 8) dos filtros, deve ser realizada com todos os filtros no sistema .

Se algum filtro não atender ao passo 8, retornar ao passo 5 e aumentar o valor de Q_{BCN}, para este filtro.

Escola de Engenharia Biblioteca MAUÁ BIM de Irajubá - EEEI

8.3- FLUXOGRAMA

Os fluxogramas das figuras 30 e 31 resumem os procedimentos apresentados no item 8.2 para um filtro sintonizado e amortecido respectivamente.

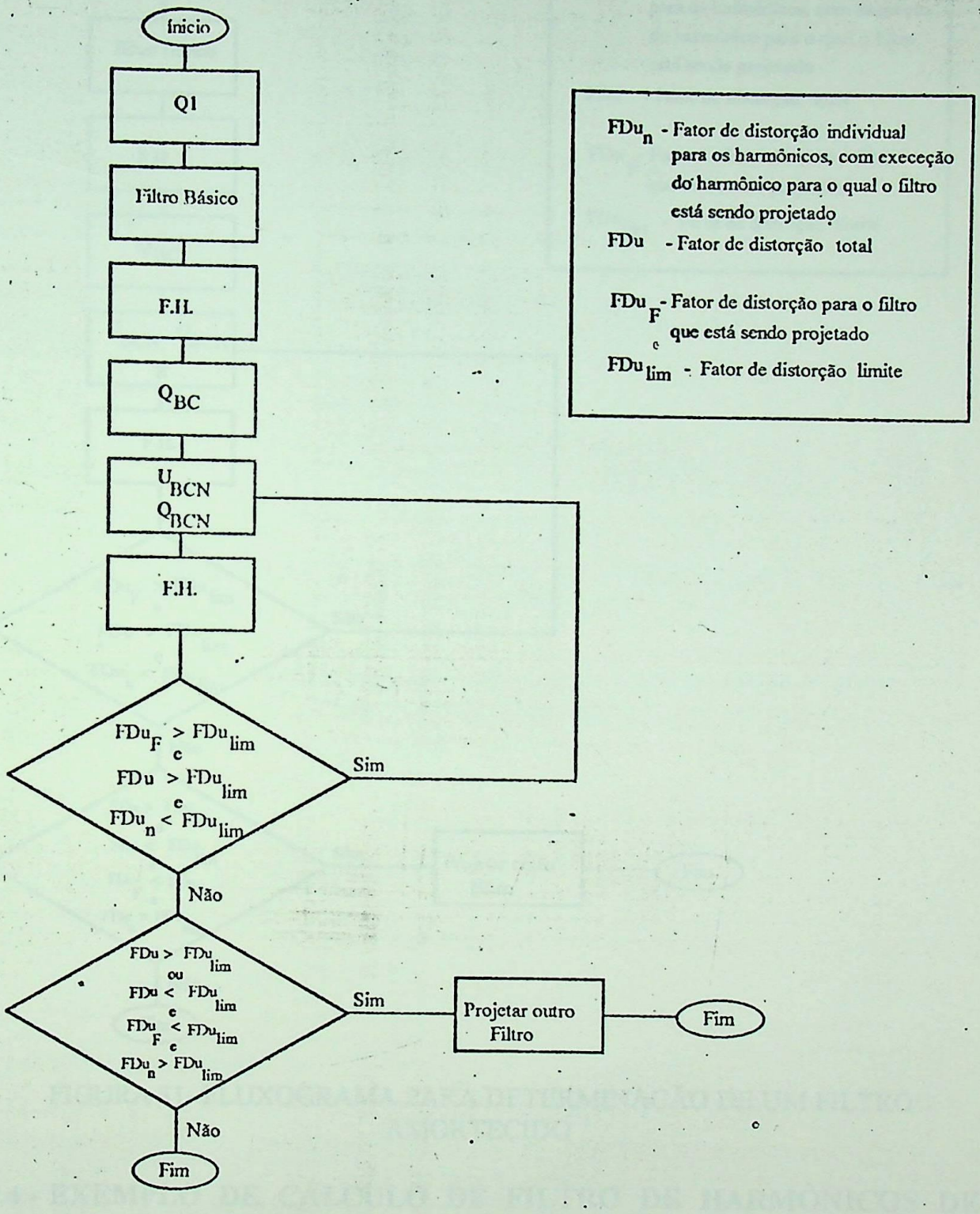


FIGURA 30- FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DE UM FILTRO SINTONIZADO

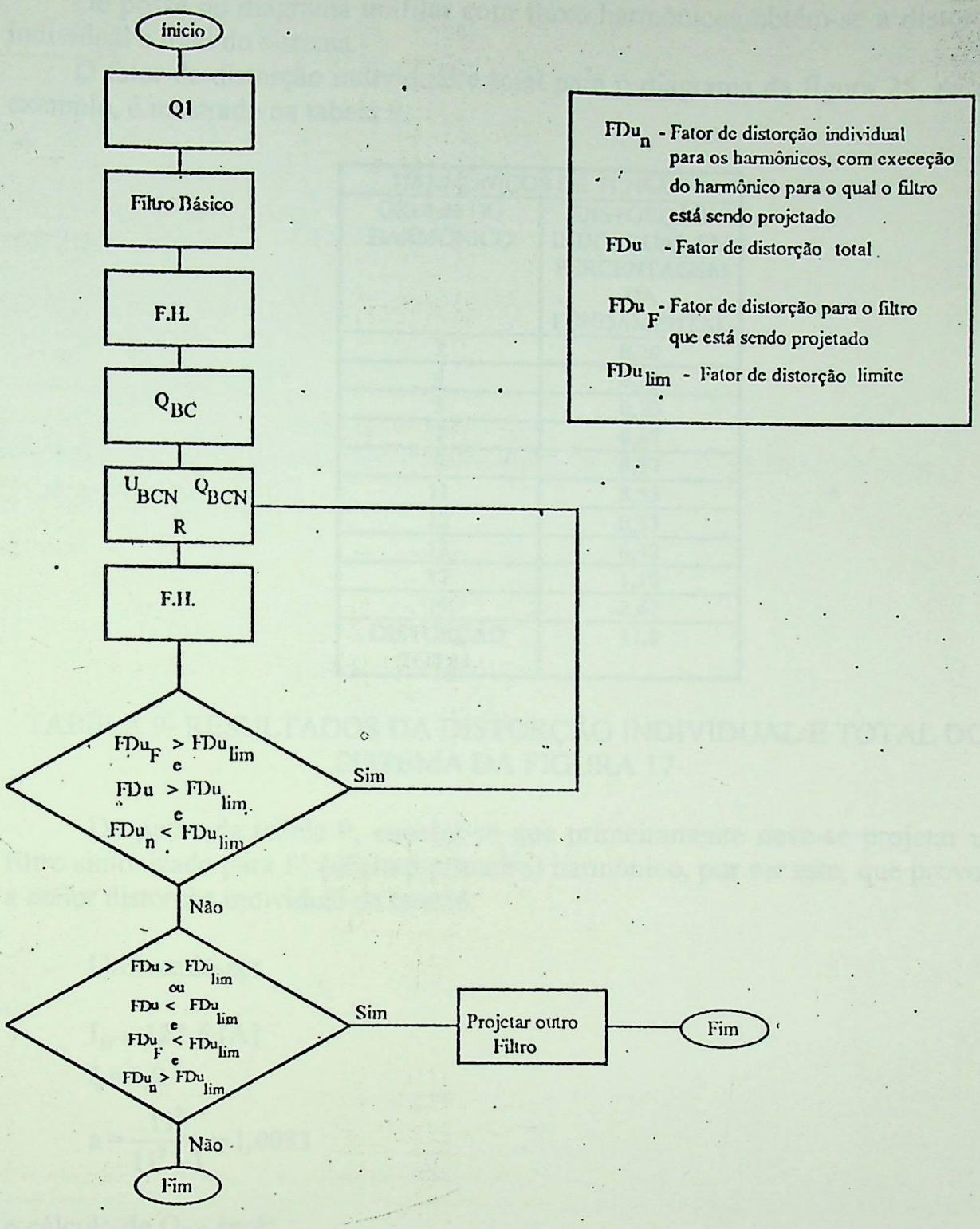


FIGURA 31- FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DE UM FILTRO AMORTECIDO

8.4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE FILTRO DE HARMÔNICOS DE CORRENTE

Considere o esquema apresentado na figura 17.

As amplitudes dos harmônicos de corrente imposto pelas duas CEE (carga elétrica especial) está mostrado na tabela 3.

Deve-se montar o diagrama unifilar do sistema em questão, a figura 25 mostra o diagrama.

De posse do diagrama unifilar com fluxo harmônicos obtém-se a distorção individual e total do sistema.

O fator de distorção individual e total para o diagrama da figura 25, para o exemplo, é mostrado na tabela 9.

HARMÔNICOS DE TENSÃO	
ORDEM DO HARMÔNICO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
3	0,20
4	0,12
5	0,70
7	0,47
9	0,57
11	8,55
12	0,33
13	6,42
17	1,16
19	2,67
DISTORÇÃO TOTAL	11,0

TABELA 9- RESULTADOS DA DISTORÇÃO INDIVIDUAL E TOTAL DO SISTEMA DA FIGURA 17

De posse da tabela 9, conclui-se que primeiramente deve-se projetar um filtro sintonizado para 11 (décimo primeiro) harmônico, por ser este, que provoca a maior distorção individual da tensão.

Utilizando-se:

$$I_{11} = 127,6 \text{ [A]}$$

$$\xi = 1,2$$

$$a = \frac{11^2}{11^2 - 1} = 1,0083$$

o cálculo de Q_{BC} será:

$$Q_{BC} = 127,6.13,8.1.0083^2 . \sqrt{\frac{3}{11.(1,1^2 - 1.0083^2)}}$$

$$Q_{BC} = 2,127 \text{ [MVAr]}$$

já U_{BC}, será:

$$U_{BC} = 1,1.13,8$$

$$U_{BC} = 15,18 \text{ [kV]}$$

De posse de U_{CN} e Q_{CN} , temos:

$$X_{C1} = \frac{15,18^2}{2,127}$$

$$X_{C1} = 108,33\ [\Omega]\ ,\ C = 24,48\ [\mu F]$$

e utilizando-se:

$$X_{R1} = 1,03.\frac{108,33}{11^2}$$

$$X_{R1} = 0,92\ [\Omega]\ ,\ L = 2,44\ [mH]$$

utilizando-se inicialmente um fator de qualidade (FQ) igual a 30, a resistência do filtro será:

$$R = \frac{11.2,403}{30}$$

$$R = 0,7491\ [\Omega]$$

Com isso no circuito da figura 32, tem-se:

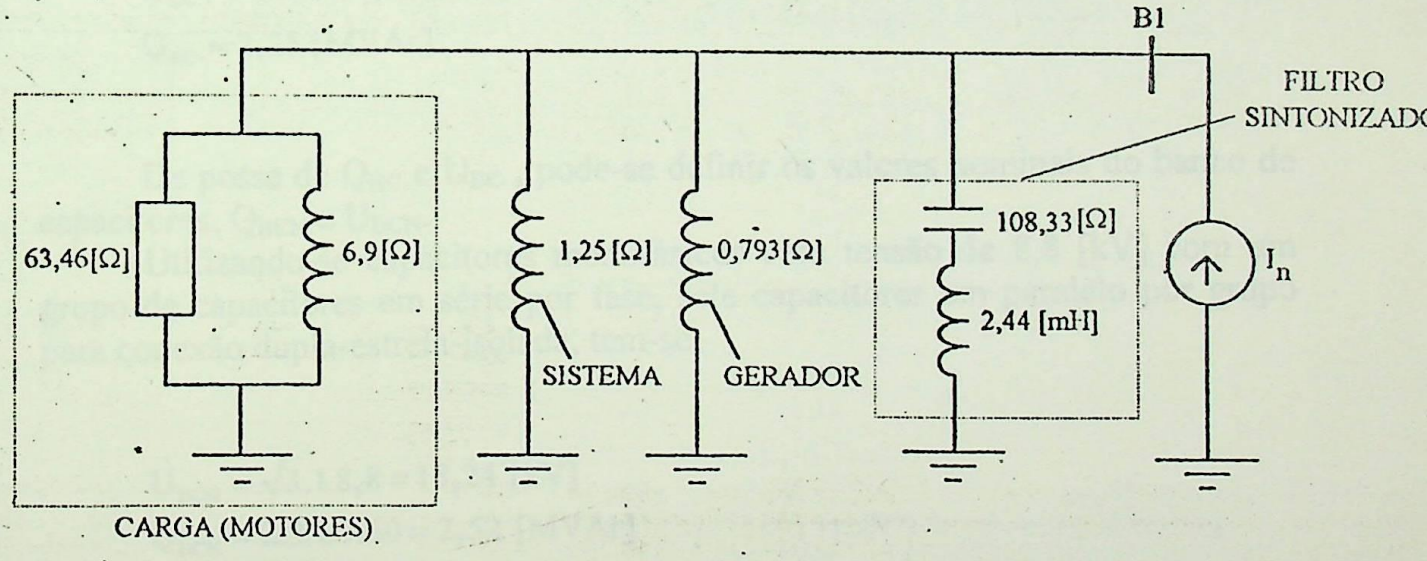


FIGURA 32- DIAGRAMA DO ESQUEMA DA FIGURA 25, POSSUINDO UM FILTRO SINTONIZADO

Executando-se um programa de fluxo harmônico, determina-se as correntes que passam pelo filtro, para que se possa calcular corretamente a potência do banco, já que através deste filtro, não passa somente correntes na frequência de sintonia, mas também correntes, a princípio, em menores intensidades devido a outros harmônicos existentes no sistema. Executando-se um programa de fluxo harmônicos, encontrou-se as correntes que passam pelo filtro básico, conforme tabela 10.

ORDEM DO HARMÔNICO	CORRENTE NO FILTRO EM AMPERES [A]
3	0,528
4	0,523
5	3,833
7	6,940
9	9,41
11	122,2
12	3,460
13	51,74
17	5,475
19	10,20

TABELA 10- CORRENTE QUE PASSA PELO O FILTRO BÁSICO DO EXEMPLO 8.4

Através da equação 46, determina-se o valor de Q_{BC}.

$$Q_{BC} = 3.108,33.\left(74^2 + 2289,75\right)$$
$$Q_{BC} = 2,25 \text{ [MVAr]}$$

De posse de Q_{BC} e U_{BC} , pode-se definir os valores nominais do banco de capacitores, Q_{BCN} e U_{BCN}.

Utilizando-se capacitores monofásicos com tensão de 8,8 [kV] com um grupo de capacitores em série por fase, sete capacitores em paralelo por grupo para conexão dupla-estrela-isolada, tem-se:

$$U_{BCN} = \sqrt{3}.1.8,8 = 18,24 \text{ [kV]}$$
$$Q_{BCN} = 2.3.1.7.60 = 2,52 \text{ [MVAr]}$$

O novo valor do filtro nominal será:

$$X_{C1} = 92,16 \text{ [}\Omega\text{]}, \; C = 28,77 \text{ [}\mu\text{F]}$$
$$X_{R1} = 0,78 \text{ [}\Omega\text{]} \; , \; L = 2,08 \text{ [mH]}$$
$$FQ = 30$$

Executando-se um novo FH, tem-se a tabela 11 (ver anexo 27).

ORDEM DO HARMÔNICO	CORRENTE NO FILTRO EM AMPERES [A]
3	0,628
4	0,627
5	4,665
7	9,227
9	38,39
11	122,0
12	3,579
13	54,45
17	5,927
19	11,11

TABELA 11- CORRENTE QUE PASSA PELO O FILTRO NOMINAL PARA O EXEMPLO 8.2

A tabela 12 mostra os valores das distorções após a colocação do filtro de 11ª ordem.

HARMÔNICOS DE TENSÃO	
ORDEM DO HARMÔNICO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
3	0,22
4	0,15
5	0,84
7	0,88
9	1,56
11	0,34
12	0,07
13	2,10
17	0,58
19	1,39
DISTORÇÃO TOTAL	3,28

TABELA 12- RESULTADOS DA DISTORÇÃO INDIVIDUAL E TOTAL DO SISTEMA APÓS A COLOCAÇÃO DO FILTRO DE 11ª ORDEM

De posse da tabela 12, deve-se verificar o projeto do filtro (Q_{TESTE} e U_{TESTE}), utilizando-se as equações 36 e 46.

$$U_{TESTE} = 1,0633.13,8\left[1+\frac{0,62}{87,1}.\frac{1}{3}+\frac{0,63}{87,1}.\frac{1}{4}+\frac{4,66}{87,1}.\frac{1}{5}+\frac{9,22}{87,1}.\frac{1}{7}+\frac{3,83}{87,1}.\frac{1}{9}+\frac{122}{87,1}.\frac{1}{11}+\frac{3,57}{87,1}.\frac{1}{12}+\frac{54,45}{87,1}.\frac{1}{13}+\frac{5,92}{87,1}.\frac{1}{17}+\frac{11,11}{87,1}.\frac{1}{19}\right]$$

$$U_{TESTE} = 1,0633.13,8[1+0,36]$$

$$U_{TESTE} = 18,9\ [kV]$$

sendo que:

$$Q_{TESTE} = 3.92,16.\left[81,7^2 + \left(\frac{0,62^2}{3} + \frac{0,63^2}{4} + \frac{4,66^2}{5} + \frac{9,22^2}{7} + \frac{38,3^2}{9} + \frac{122^2}{11} + \frac{3,57^2}{12} + \frac{54,4^2}{13} + \frac{5,92^2}{17} + \frac{11,11^2}{19}\right)\right]$$

$$Q_{TESTE} = 3.92,16.[6674 + 1770]$$

$$Q_{TESTE} = 3\ [MVAr]$$

Como $U_{TESTE} > U_{BCN}$ e $Q_{TESTE} > Q_{BCN}$ e os valores de distorção estão dentro dos limites segundo [33], deve-se aumentar o valor de Q_{BCN}. Neste exemplo, o valor do banco de capacitores (do filtro 11ª) para suportar os harmônicos ficou em um valor muito elevado, tomou-se a decisão de se instalar outro filtros.

A segunda maior distorção está no harmônico de 13ª ordem. A inserção deste filtro no sistema, ocasionou uma diminuição no fator de distorção individual deste harmônico, o qual era de valor elevado, mas um aumento de distorção individual nos harmônicos de ordem mais baixa (5,7) foi observado, decidiu-se então, instalar um terceiro filtro, o de 7 ordem. Quando foi inserido o filtro de 13ª ordem, o filtro de 11ª ordem passou a absorver menos harmônicos de corrente, com isso, o banco de capacitores pode ser de menor potência.

Com os três filtros inseridos no sistema, e aumentando-se a potência de um de cada vez, mantendo-se os valores de ξ em 1,15, 1,1 e 1,1 para os filtros de 7ª, 11ª e 13ª ordens respetivamente, encontrou-se os seguintes valores dos filtros na qual satisfazem os limites de distorção segundo [33] e a suportabilidade dos harmônicos pelo banco de capacitores do filtro:

FILTRO DE 7ª ORDEM

ξ=1,15
U_{BCN}= 19,93 [kV]
Q_{BCN}= 0,780 [MVAr]
Reator= 18,11 [mH], FQ=30
Tensão da unidade capacitiva: 9,2 [kV]
Potência da unidade capacitiva: 65 [kVAr]
Número de capacitores em série por fase: 1
Número de capacitores em paralelo por grupo: 4
Conexão estrela-isolada

FILTRO DE 11ª ORDEM

ξ=1,1
U_{BCN}= 15,24 [kV]
Q_{BCN}= 7,2 [MVAr]
Reator= 0,726 [mH], FQ=30
Tensão da unidade capacitiva: 4,4 [kV]

Potência da unidade capacitiva: 60 [kVAr]
Número de capacitores em série por fase: 2
Número de capacitores em paralelo por grupo: 7
Conexão dupla-estrela-isolada

FILTRO DE 13ª ORDEM

ξ=1,1
U_{BCN}= 16,62 [kV]
Q_{BCN}= 1,380 [MVAr]
Reator= 3,23 [mH], FQ=30
Tensão da unidade capacitiva: 8,8 [kV]
Potência da unidade capacitiva: 114 [kVAr]
Número de capacitores em série por fase: 1
Número de capacitores em paralelo por grupo: 4
Conexão estrela-isolada

Assim a distorção final conseguida é mostrada na tabela 13, a figura 33 mostra o resultado das tensões fase-neutro devido a cada harmônico, antes e após a colocação dos filtros no sistema.

HARMÔNICOS DE TENSÃO	
ORDEM DO HARMÔNICO	DISTORÇÃO INDIVIDUAL EM PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
3	0,26
4	0,21
5	1,89
7	0,16
9	0,18
11	0,09
12	0,04
13	0,21
17	0,23
19	0,23
DISTORÇÃO TOTAL	2,04

TABELA 13- RESULTADOS DA DISTORÇÃO INDIVIDUAL E TOTAL FINAL DO EXEMPLO 8.4

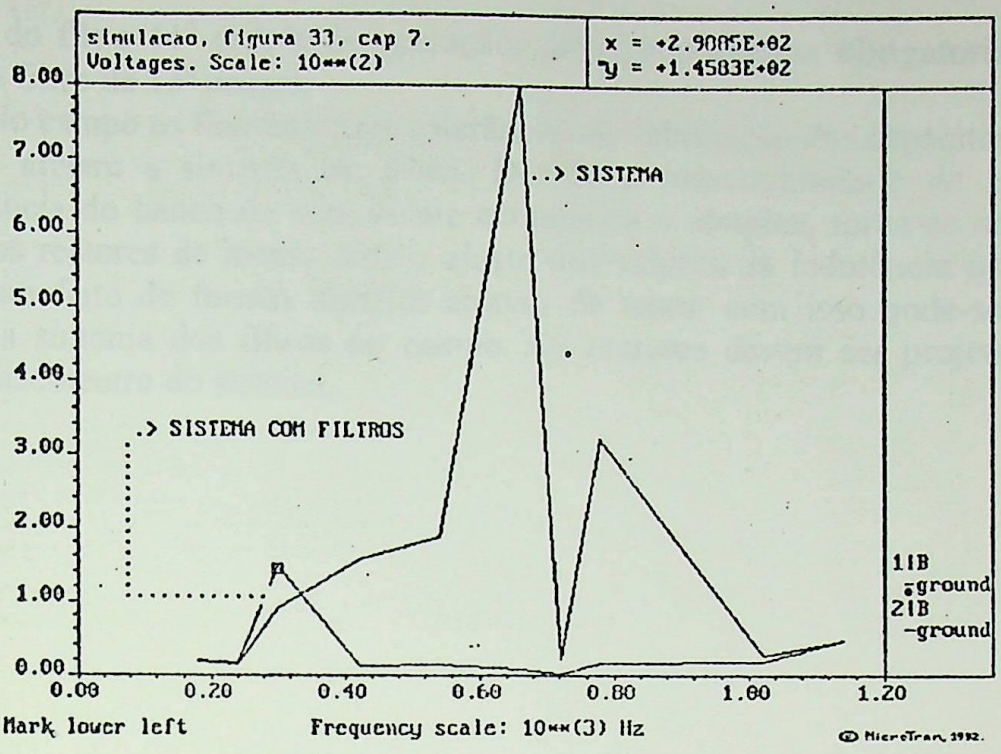


FIGURA 33- ESPECTRO DOS HARMÔNICOS DE TENSÃO (FASE-NEUTRO), COMPARANDO O SISTEMA VERSUS O SISTEMA+FILTROS, PARA O EXEMPLO 8.4

9- CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida no item de correção do fator de potência na presença de cargas elétricas especiais providencia a correção do fator de potência em situações onde harmônicos de corrente estão presentes. A instalação de banco de capacitores com reatores de bloqueio (filtro), altera a frequência de ressonância caso fosse colocado no sistema apenas banco de capacitores, com isso evita-se possíveis problemas de ressonância no sistema, já que os filtros são sintonizados para frequências não característica de um sistema ($4{,}1 \leq n \leq 4{,}5$). Apesar da instalação de banco de capacitores com reatores de bloqueio não ter objetivo de absorção dos harmônicos de corrente, estes providenciam um melhoramento no fator de distorção do sistema.

A instalação de filtros para absorção de harmônicos de corrente promove uma diminuição do fator de distorção do sistema a níveis não prejudiciais a operação de equipamentos e sistema. A tabela 13 comparada com a tabela 9, mostra-se que devido aos filtros de harmônicos, os fatores de distorção diminuíram a níveis desejados (segundo [33] - ver capítulo 3) A instalação de filtros de harmônicos melhora o fator de potência da instalação, não sendo este, o objetivo.

Após o projeto dos filtros, deve-se analisar a situação de contingência, saída de filtros de operação, podem provocar ressonância e consequentemente sobretensões perigosas a integridade do sistema. No exemplo 8.2, a situação da saída do filtro de 11ª ordem proporcionou uma ressonância e um aumento de sobretensão no sistema para o harmônico de 11ª ordem, devido a isto, deve haver um intertravamento entre o filtro de 11ª ordem e o 13ª ordem, em outras palavras,

a saída do filtro 11ª ordem de operação, deve proporcionar obrigatoriamente a saída do filtro de 13ª ordem.

No campo os fatores como: tolerâncias de fabricação dos capacitores e dos reatores afetam a sintonia do filtro. Devido a impossibilidade de ajuste da capacitância do banco de uma forma econômica e simples, torna-se necessário prover os reatores de meios para o ajuste dos valores da indutância no campo, sendo isto feito de formas simples através de tapes, com isso pode-se fazer o ajuste da sintonia dos filtros no campo. Os reatores devem ser projetado para tensão fase-neutro do sistema.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

CONCLUSÕES

A dissertação apresentou ao longo dos capítulos, problemas e soluções referentes a instalação de banco de capacitores "shunt".

O capítulo I apresentou um resumo dos aspectos relativos a capacitores (fabricação, normas, características elétrica e mecânica, ensaios) que serve de base para o entendimento dos capítulos futuros.

O estudo de potências ativa e reativa e do fator de potência em situações senoidais e não senoidais foi realizado no capítulo II recomendando, que para evitar supresas que possam surgir devido aos harmônicos, corrigir o fator de potência para 0,94, embora a portaria do DNAEE (Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica) estabeleça que o fator de potência de referência, a partir de março de 1994, é de no mínimo 0,92. O DNAEE para redigir a portaria de modo a conseguir um concenso (portaria 1569) entre concessionária e consumidor, elaborou três portarias em menos de 2 anos, a princípio estas portarias deveriam ter sido elaborados com mais cuidado, pois trata-se de uma mudança radical tanto na elevação do fator de potência de referência como no modo de calcular o reativo excedente.

As principais cargas e situações com baixo fator de potência, bem como as cargas que distorcem as formas de ondas da tensão e da corrente foram apresentada no capítulo III, onde destacou-se o cuidado que deve existir com operações dos motores e transformadores a vazio, e equipamentos que utilizam a eletrônica de potência, pois estes operam com o fator de potência a níveis baixos.

A operação de cargas que distorcem as formas de onda da tensão e corrente (cargas elétricas especiais), leva a possíveis problemas na operação de outros equipamentos caso estejam eletricamente próximos a banco de capacitores.

A forma de conexões dos bancos de capacitores apresentada no capítulo IV, mostrou que é mais viável a utilização da conexão triângulo protegidos por fusíveis em baixa tensão. Em alta tensão, como regra básica e caso não haja problemas no sistema que proíba o uso de uma conexão ou outra, a escolha do tipo de conexão a ser usada em bancos de capacitores com tensões acima de 1000 [V], depende da configuração do sistema, se aterrado ou não. A regra básica é que o banco de capacitores só deverá ser aterrado quando instalados em sistemas efetivamente aterrados. Vale salientar que os sistemas em média tensão são geralmente sistemas isolados, com isso deve-se projetar bánco de capacitores com neutro isolado (estrela-isolada) ou em delta.

No capítulo V, recomendou-se utilizar o fusível que tenha uma corrente nominal acima do valor da corrente nominal do banco de capacitores, este fusível deve ser dimensionado para suportar: a sobretensão admissível do sistema e a variação da capacitância do banco de capacitores estipulados por norma. O fusível naturalmente não deve operar durante a energização de bancos de capacitores e sempre que possível utilizar fusíveis limitadores de corrente, devendo proteger tanto quanto a queima de unidades capacitivas como a curto-

circuitos (fase-terra ou fase-fase). Na conexão estrela-isolada deve-se evitar utilizar fusíveis limitadores de corrente.

Caso a corrente de curto-circuito não seja adequada para operar o fusível, a conexão prevista para o banco de capacitores, deve então ser alterada.

No capítulo VI , analisou-se os equipamentos de manobra os quais deverão ter uma corrente nominal acima do valor da corrente nominal do banco de capacitores, devendo ser dimensionadas para suportarem uma corrente devido: a sobretensão do sistema admissível e a variação da capacitância do banco de capacitores estipulados por norma. O equipamento de chaveamento, deve ser capaz de energizar o banco de capacitores e suportar a corrente transitória, no caso de capacitores equipados com relés que automaticamente realizam operações de chaveamento para o controle de tensão de sistemas, a chave requer condições especiais, ou requer uma diminuição forçada da corrente de energização, obrigando-se assim o uso de limitadores de corrente.

A metodologia desenvolvida no item de correção do fator de potência na presença de cargas elétricas especiais no capítulo VII, providencia a correção do fator de potência em situações onde harmônicos de corrente estão presentes. A instalação de banco de capacitores com reatores de bloqueio (filtro), altera a frequência de ressonância caso fosse colocado no sistema apenas banco de capacitores, com isso evita-se possíveis problemas de ressonância no sistema, já que os filtros são sintonizados para frequências não característica do sistema. Apesar da instalação de banco de capacitores com reatores de bloqueio não ter objetivo de absorção dos harmônicos de corrente, estes providenciam uma melhoria no fator de distorção do sistema.

A instalação de filtros para absorção de harmônicos de corrente promove uma diminuição do fator de distorção do sistema a níveis não prejudiciais a operação de equipamentos e sistema. A instalação de filtros de harmônicos de corrente melhora o fator de potência da instalação, não sendo este, o seu objetivo principal.

Após o projeto dos filtros, deve-se analisar a situação de contingência, saída de filtros de operação, para evitar possíveis problemas com sobretensões perigosas à integridade do sistema. No campo os fatores como: tolerâncias de fabricação dos capacitores e dos reatores afetam a sintonia do filtro. Assim na impossibilidade de ajuste da capacitância do banco de uma forma econômica e simples, torna-se necessário prover os reatores de meios para o ajuste dos valores da indutância no campo (ver anexo 29), tornando possível fazer o ajuste da sintonia dos filtros em campo. Os reatores devem ser projetado para tensão fase-neutro do sistema.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

RECOMENDAÇÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

1 - Desenvolver a partir dos sistema proposto no capítulo VII, um programa ("software") para que os filtros sejam definidos de modo automático.

2 - Aplicar a metodologia proposta no capítulo VII para bancos de capacitores automáticos visando a correção do fator de potência hora a hora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

[1] Cogo, J.Roberto, "Correção do Fator de Potência", apostila do Curso da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação, Itajubá, EFEI, 1995.

[2] Saraiva, D. B., "Materiais Elétricos", Isolantes e Dieletricos, Editora Guanabara, Rio de janeiro, 1988, pág. 100.

[3] Mamede, J. F., "Manual de Equipamentos Elétricos", Vol.I e II, Capacitores de Potência, Editora Livros Tecnicos e Cientificos LTDA, Rio de Janeiro-São Paulo, 1993.

[4] Associação Brasileira de Normas Tecnicas (ABNT), NBR-5282, " Capacitores de Potência em Derivação Para Sistemas de Tensão Nominal Acima de 1000[V]", Maio, 1988.

[5] International Eletrotechical Comission (IEC), IEC-871-1, "Shunt Capacitor for A.C. Power System Having a Rated Voltage Above 660[V]", COBEI - CB-3-ABNT, 1987.

[6] Institute of eletrical and electronics Enginners (IEEE), "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors", Revision of IEEE - Std 18-1992, Global Info Centures, New York, february, 1993.

[7] Institute of eletrical and electronics Enginners (IEEE), IEEE Std 1036-1992, "IEEE Guide For Aplication of Shunt Power Capacitors", Global Info Centures, New York, february, 1993.

[8] Associação Brasileira de Normas Tecnicas (ABNT), NBR - 5282 -1977, "Capacitores de Potência", Junho, 1977.

[9] American National Standards Institute (ANSI) / Institute of eletrical and electronics Enginners (IEEE), Std 18-1980, "IEEE Standart For Shunt Power Capacitors", 1980.

[10] National Eletrical Manufacturers Association (NEMA), Pub. NO. CP 1-1973, Standart Publication - "Shunt Capacitors", New York, 1973.

[11] International Eletrotechical Comission (IEC) - IEC 831-1 "Shunt Power Capacitor of the- Healing Type For A.C. System Having a Rated Voltage Up to and Incluind 660[V]", COBEI - CB-3-ABNT, 1987.

[12] Asea Brown Boveri LTDA (ABB), "Capacitores de Potência em Baixa Tensão", Departamento de Sistemas de Potência, Catálogo start-BR 101, 1991.

[13] INDUCON, "Capacitores Para Correção do Fator de Potência em Baixa Tensão, Catálogo BAC15-004, outubro, 1988.

[14] Indústria de Transformadores Elétricos S.A. (ITEL), "Capacitores para Correção do Fator de Potência, "Capacitores Impregnados com Líquido Isolante", Manual de Instruções , N° 01/CP, São Paulo.

[15] INEPAR , "Capacitores de Potência", Catálogo UN. 2.17, Agosto, 1991.

[16] POLITEL, "Manual de Instruções", N° 001/BT91, São Paulo.

[17] INDUCON, "Capacitores de Potência, Alta Tensão", Manual de Instruções, Catálogo AT-004A, Novembro, 1986.

[18] Milash, M., "Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante", Ascareis, Centrais Elétricas Brasileiras S.A, Editora Edgrad Bluicher LTDA, São Paulo, 1984, pág. 184.

[19] Marcelo, A. B., Alcan Alumínio do Brasil S.A, "Cuidados Especiais para Instalação de Bancos de Capacitores na Presença de Harmônicos", Artigo, Ouro Preto, MG, Brasil.

[20] Cogo, J. R., Apostila da Disciplina de Cargas Elétrica Especiais, Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 1993.

[21] Tadeu, A.L.de Almeida, Giberto, C. F., "Acionamentos Controlados de Motores de Indução Trifásicos", Harmônicos, Apostila do Curso de Extensão Universitária de Taubaté, 1992.

[22] Associação Brasileira de Normas Tecnicas (ABNT), NBR-5060, "Guia para Instalação e Operação de Capacitores de Potência", 1977.

[23] Sarmento, C. O., "A Proteção dos Pequenos Bancos de Capacitores", Mundo Elétrico, Outubro, 1968.

[24] AIEE Committee Report, "Report on the Operation and Maintenance of Shunt Capacitors", AIEE Transactions, 1949, pág. 1208-1218.

[25] Johnson, A. A., Eletrical Transmission de Distribution Reference Book, "Application of Capacitors to Power Systems", pág. 233-263.

[26] Sickle, R.C., Van, Z. J., "Capacitor Switching Phenomena", AIEE Transactions, Vol. 70, 1951, pág. 131-139.

[27] INDUCON, "Capacitores de Potência com Fusíveis Internos", Catálogo FI-002, 1991.

[28] ASEA, "Power Capacitor with Internal Fuses Brochure", KR-0-317E, 1985.

[29] Barbosa, M.A, "Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos Industriais", Belo Horizonte, Escola Federal da UFMG, 1988, Cap. 2, Pág. 4-20, Dissertação de Mestrado.

[30] VI CBE, , I seminário Latino Americano de Energia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Clube de Engenharia, "Cenário de conservação de Energia para Minas Gerais, ANAIS, "VI Congresso Brasileiro de Energia", Volume II, 1993, pág 588.

[31] Asea Brown Boveri LTDA (ABB) - "Principios de Acionamentos CA", Apostila do Curso de Treinamento da ABB, 1992.

[32] Institute of eletrical and electronics Enginners (IEEE), IEEE - Std - 519, "IEEE Guide for Harmonic Control e Reactive Compensation of state Power Capacitors", Global Info Centures, New York, february, 1992.

[33] Institute of eletrical and electronics Enginners (IEEE), IEEE - Std-519, "IEEE Rccommended Pratices and Requirements for Harmonic Control in Eletrical Power Systems", Global Info Centures, New York, february, 1992.

[34] Mamede, J. F., Instalações Elétrica Industriais, "Correção do Fator de Potência", Editora Livros Tecnicos e cientifícos, 3° Edição, Rio de Janeiro, 1988, pág. 109.

[35] Cogo J.R. eT alli, Eletrobrás, Centrais Elétricas Brasileiras S/A, PROCEL,CEMIG, "Avaliação do Desempenho Dos Motores Elétricos Trifásicos", Relatório Síntese, Belo Horizonte, Junho, 1990.

[36] POLITEL, Equipamentos Elétricos LTDA, Manual, "Correção do Fator de Potência", POLE -03/08, São-Paulo.

[37] Mamede, J. F., "Economia de Energia Elétrica na Industria e Comercio II", Revista Mundo Elétrico, Abril, 1988, pág. 43.

[38] Associação Brasileira de Metais (ABM), "Operação de Fornos Elétricos", 2.a Edição, 1978.

[39] Arrillaga, J. eT alii, Chichester, J. W., "Power System", cap. II, ,1985, Pág.115.

Escola Fed... Engenharia Biblioteca MAUÁ EIM EREI

[40] Secretaria Nacional de Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Eléctrica (DNAEE), Portaria N° 85, Diário Oficial, Seção 1, 25 de Março de 1992, publicação 26 de Março de 1992.

[41] Secretaria Nacional de Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Eléctrica (DNAEE), Portaria N° 613, Diário Oficial, Seção 1, 9 de Junho de 1993, publicação 14 de junho de 1993.

[42] Secretaria Nacional de Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Eléctrica (DNAEE), Portaria N° 1569, Diário Oficial, Seção 1, 23 de Dezembro de 1993, publicação 24 de Dezembro de 1993.

[43] Luis E. L., Guilherme E. Filippo F. F., "Conservação de Energia Elétrica na Indústria, ABACE, São-Paulo, 1988.

[44] Cogo,J. R., Sá, J. S., Nelson, W.B. S., Jaime, A. B., "Análise do Desempenho dos Motores Trifásicos Nacionais", revista Mundo Elétrico, Fevereiro,1993, pág. 26.

[45] Donald, F. M., "Application Guide for Shunt Capacitors on Industrial Distribuition System at Medium Voltage Levels", IEEE, vol 1A-12, N° 5, september/october,1976, pág. 444-459.

[46] Manual INDUCON, "Capacitores de Potência", 2° Edição, Outubro, 1983.

[47] Associação Brasileira de Metais (ABM), Seminário Anual de Fornos Elétricos, 28 a 31 de Maio, Rio de Janeiro, RJ, 1979.

[48] Heraldo P., Magalhães, C. S., Antônio, J. B., "Correção do Fator de Potência na Industria", Edição VIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Curitida, 1980.

[49] Hermes, R. P.M. de Oliveira, "Aplicações de compensadores estáticos em sistemas elétricos", Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 1994.

[50] Report on the Operation of Switched Capacitors, AIEE Committee Report, AIEE Transactions and Distribution, December, 1955.

[51] Mauro, C., "Terceira Portaria, e o Novo Fator de Potência Já Vale em Abril", Revista Eletricidade Moderna, n° 239,Fevereiro, 1994.

[52] Report of a Survey on the Connection of shunt capacitor Banks, AIEE Committ Report, AIEE transactions, 1959, pág. 1388-1393.

[53] Roberto, L. R., "Bancos de Capacitores p/Compensação de Sistemas de Transmissão, Revista Mundo Elétrico, Fevereiro, 1978.

[54] Mendis, S.R., Bishop, M.T., McCall, J.C., Hurst, W.M., "Overcurrent Protection of Capacitors Apllied on Industrial Distribution Systems", IEEE Transactions on Industy Apllications, Vol 29, May/June, 1993.

[55] Clark, N.R., Farnham, S.B., "Connection Arrangements e Protective practices for Shunt Capacitor Banks", AIEE Transactions, 1949, pág. 1226.

[56] INEPAR, Catálogo, "Fusíveis para Proteção de Capacitores", Cat. IN.2.13, Janeiro, 1991.

[57] Butler, J.W., "Analysis of Factors Which Influence the Aplication, Operation, and Design of Shunt-Capacitor Equipments Switched in Large Banks", AIEE Committee on Power Transmission and Distribution, Vol.59, 1940.

[58] Alain, F.S. Levy, Manoel, C.M. Atallah, Albina, C. F., Eduardo, C., Luiz F. P., Olício, B.Jr., "Avaliação do Real Desempenho de Capacitores de Potência", Revista Eletricidade Moderna, Março, 1995. pág 52.

[59] Associação Brasileira de Normas Tecnicas (ABNT), NBR-5060, "Guia de Instalação e Operação de Capacitores de Potência- Procedimento", 1977.

[60] Barbosa, M. A., Andrade, J.C., "Distorções Harmônicas: Uma Visão de Consumidor sobre os Critérios Recomendados pela Legislação Brasileira", 3° Erlac. Cigré, Foz do Iguaçu, 1989.

[61] GCOI/SCEL/GTEE, "Critérios e Metodologia para o Atendiemento a Consumidores com Cargas Especiais", Eletrobrás, Relatório SCEL-GTEE-03/84, Julho, 1984.

[62] GCOI/SCEL/GTEE, "Critérios e Metodologia para o Atendiemento a Cargas Especiais - Compilação das Respostas ao Questionário Levantamento da Experiência de Planejamento sobre Cargas Especiais", Eletrobrás, 1986.

[63] Mello, C.A.F., Fontoura, R.N. Filho, "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", GCOI/GCPS/Eletrobras,XII SNPTEE, Recife, abril, 1993.

[64] Sarasola, P. A. Cuervo, "Fusíveis Limitadores de Corrente em Média Tensão", Revista Mundo Elétrico, Agosto, 1984.

[65] GCOI/SCEL/GTEE, "Critérios e Metodologia para o Atendiemento a consumidores com Cargas Especiais", Eletrobrás, Relatório SCEL-GTEE-01/88, Janeiro, 1988.

[66] Cogo,J. R.,"Critérios para dimensionamento de filtros de harmônicos", Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá, Minas gerais, Brasil.

[67] Edson, W., Richard, S., "Potência Ativa e Reativa Instantâneas em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas", COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, SBA-Controle e Automação.

[68] Stasi, L. D., "Fornos Elétricos", editora Hemus, Cap. 2 e 4, São Paulo,SP, 1981.

[69] Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), Subcomitê de Estudos Elétricos (SCEL) , Comissão de Estudos de Cargas Especiais (CECE), Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS), Comitê Técnico para Estudos dos Sistemas de Tranamissão (CTST), Grupo de Trabalho para Estabeleciemnto de Critérios de Planejamento (GTCP), "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especias", fevereiro, 1993.

[70] SIEMENS, OLiveira N. Junior, "Tecnologia de acionamentos", São Paulo, junho, 1992.

[71] ASEA BROWN BOVERI (ABB), ABB Drives, "Large Adjustable-Speed AC Drives", catálogo CH-4UE 90 008E.

[72] Alves, M. F., "Critérios para Especificação e Prejeto de Filtros de Harmônicos", Revista Eletricidade Moderna, pág. 30, junho, 1994.

[73] Cogo, J. R., "Definição de filtros de Harmônicos para Correção do Fator de Potência", Revista Eletricidade Moderna, nº 255, Junho, 1995, pag. 110.

[74] Industria de transformadores elétricos S.A. (ITEL), Manual, "Capacitores de Potência", Fábrica 1, São paulo, SP, Brasil.

[75] WEG acionamentos LTDA, " Contatores para comutação de capacitores - Correção do Fator de Potência", Jaraguá do Sul, Santa Catarina, março, 1994.

[76] Engenharia e Comercio LTDA (GSI), Medição na Metalurgica de Mogi Guaçu LTDA, Mogi Guaçu, São Paulo, 1994.

[77] Asea Brown Boveri (ABB), ABB Power Systems AB, "Static VAR Compensator", catálogo Pamphlet A02-0102E, Sweden, 1990.

[78] BEGHIM Industria e comércio S.A., Disjuntores do tipo DIMATÍC-DM, catalógo CAT-BT 8/88, São paulo, 1988.

[79] Galvão, A. S., Aragão, C. S . L., Trabalho de Diploma, Orientador- Manuel Luís B. Martinez, "Regras que Devem Ser Observadas na Especificação da Tensão Nominal de um Pára-raios para Banco de Capacitores", Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá, junho, 1995.

[80] IEEE - Institute of eletrical and electronics Enginners - Std 141-1986, "IEEE Recommended Pratices for Electric Power Distribution for Industrial Plants", december, 1986.

[81] Garcia, F. C., Economia de Energia em Motores Elétricos, "Motores de Alto Rendimento Plus", WEG MOTORES LTDA, 1995.

[82] IEEE - Institute of eletrical and electronics Enginners - Std c37.99-1990, "IEEE guide for Protrction of shunt banks", September, 1990.

[83] Lacoste, A., Brewer, G.L., Ekstrom, A., Le Du, A., Lindh, C., Povh D., Young, D.J., "A.C. Harmonic Filter and Reactive Compesation for HVDC", Revista Electra 63, 1978.

[84] Kimbark, "Direct Current Transmission", Harmonics and Filters, Chapter 8, pp. 295-390.

DATA ...../...../19 .....
ROC. .....
ED .....
C. V. .....
R$ .....

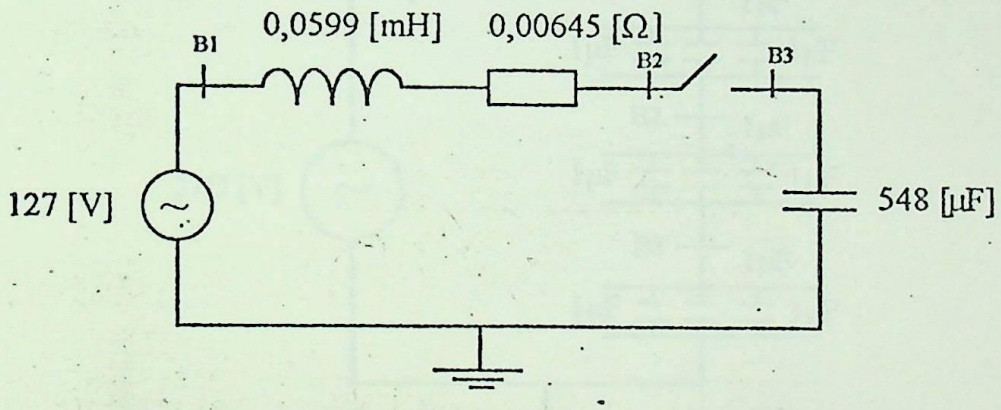
I V O
BIM - EFEI

DATA	[illegible]

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200811
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

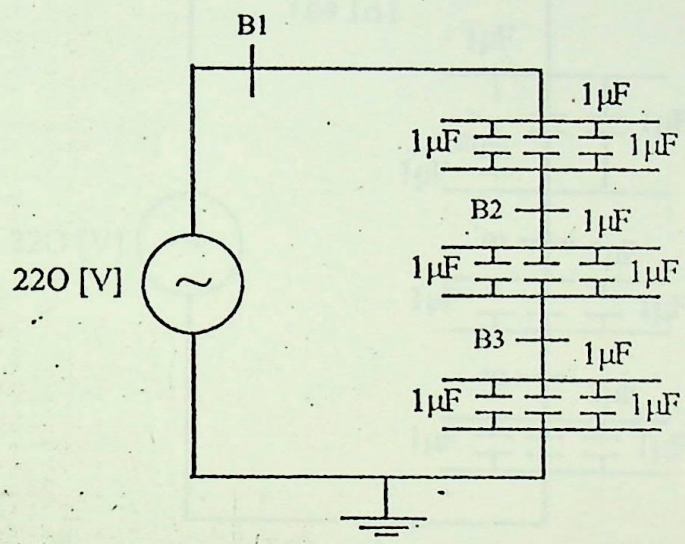
ANEXOS 1 A 28

DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA E ARQUIVO DE DADOS UTILIZADOS

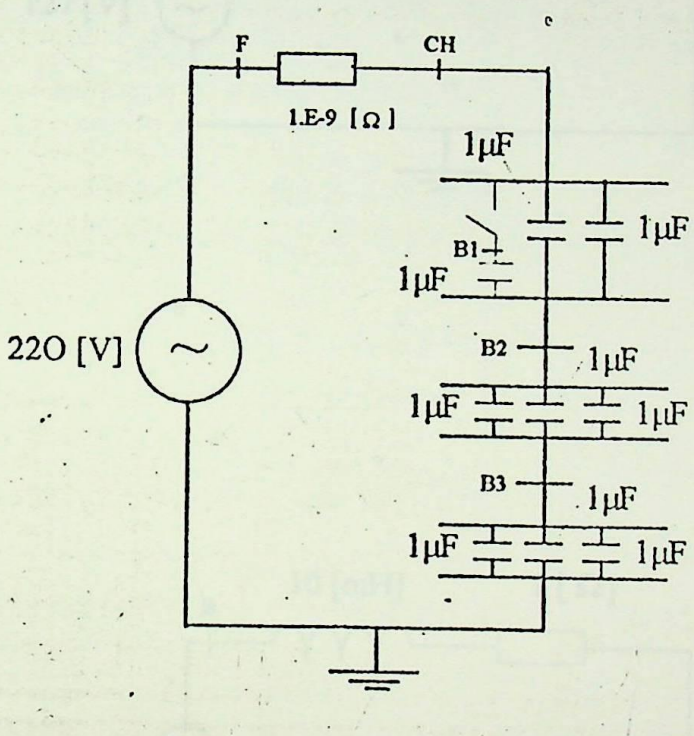


Escola Politécnica de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

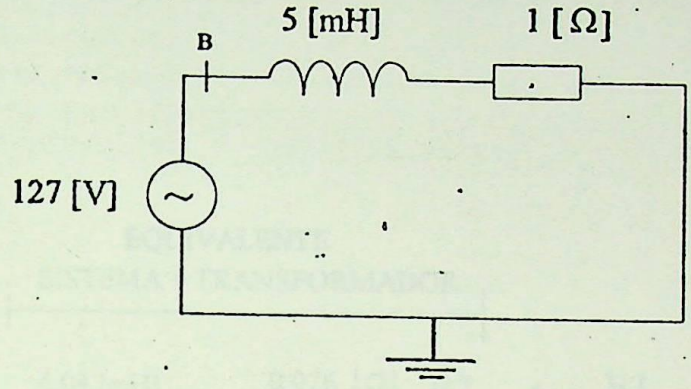
ANEXO 1

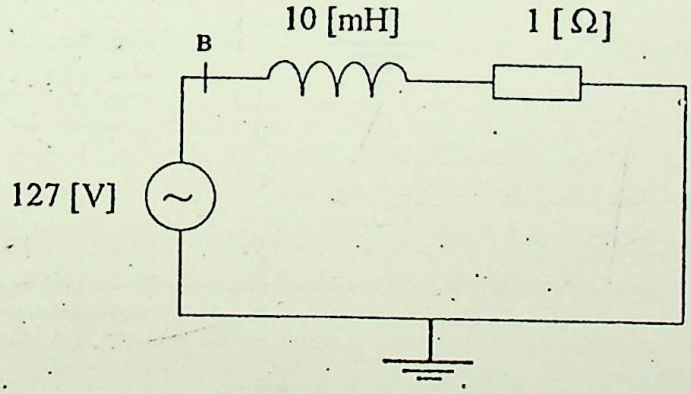


ANEXO 2

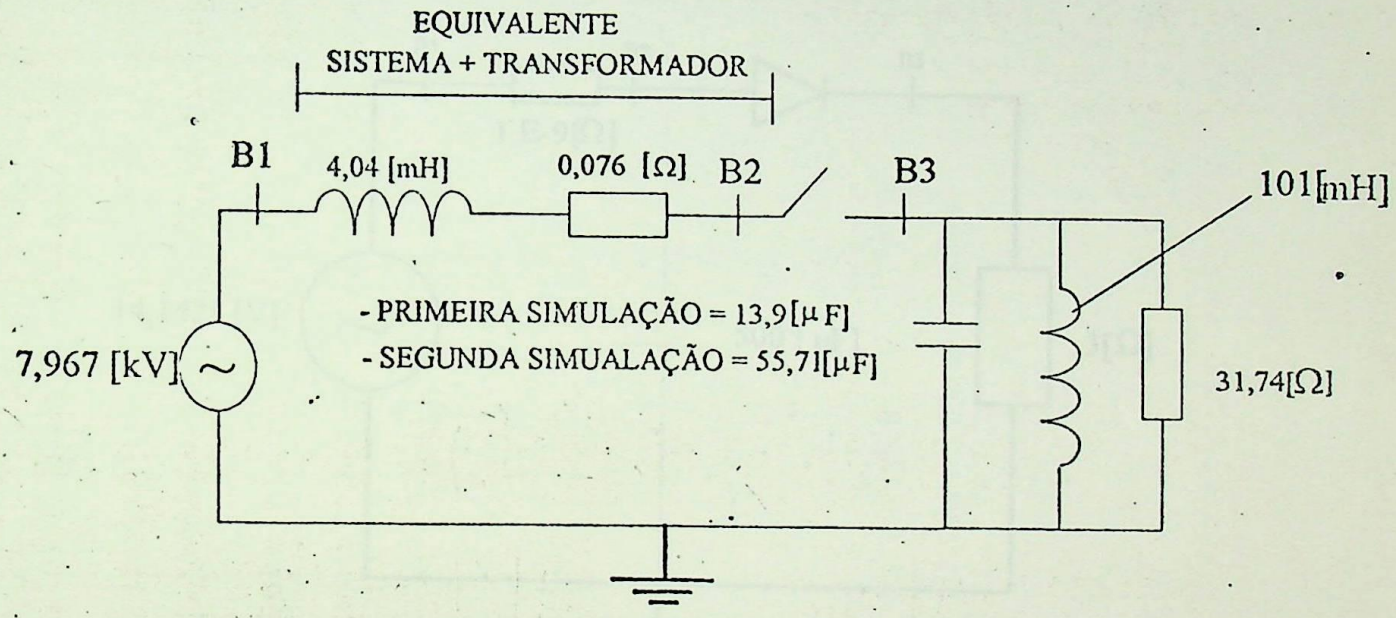


ANEXO 3



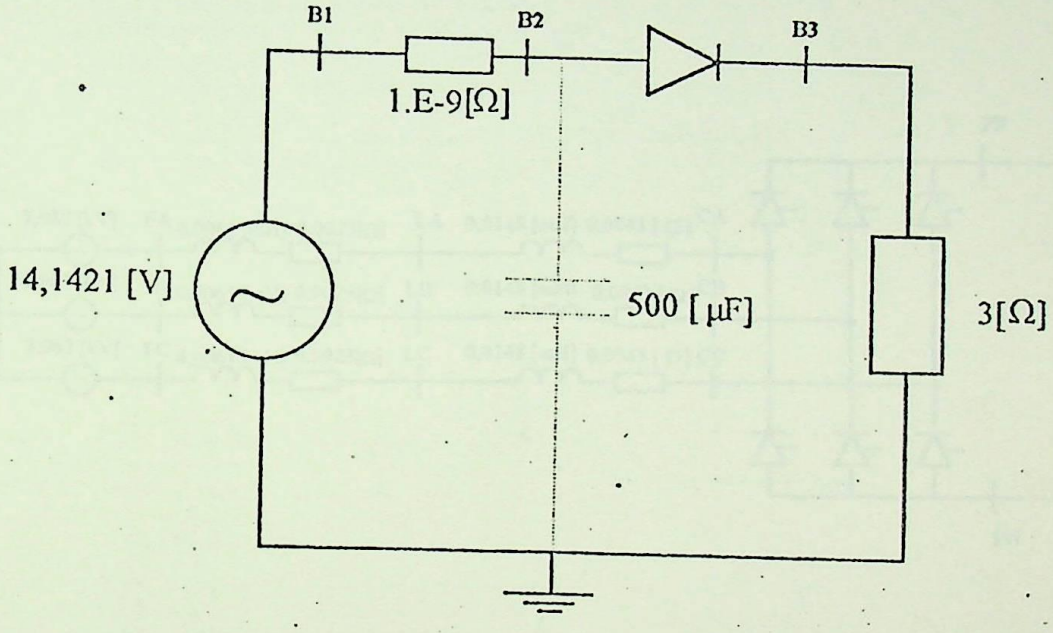


ANEXO 4

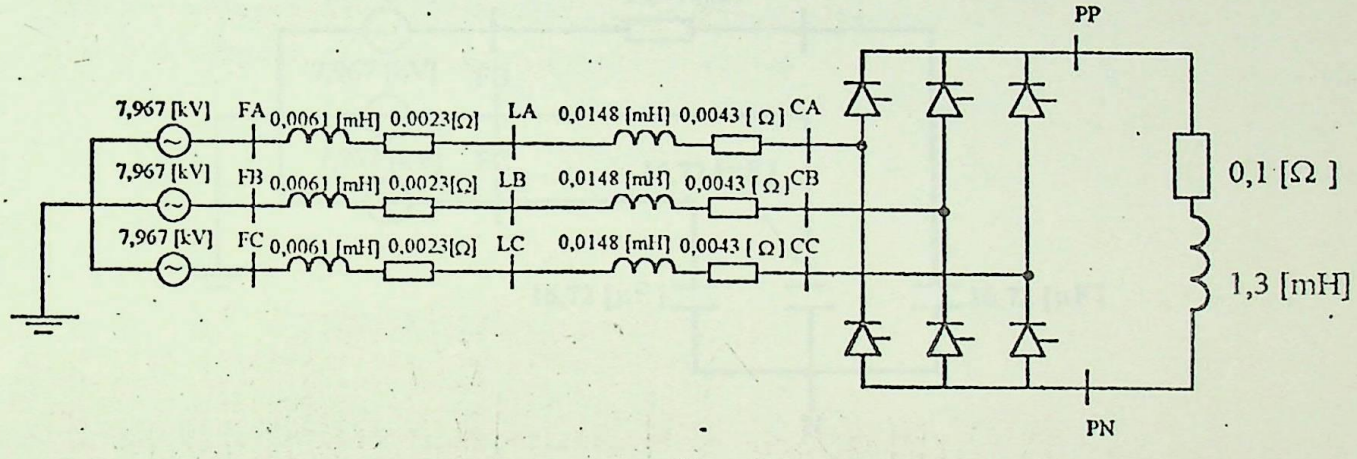


ANEXO 5

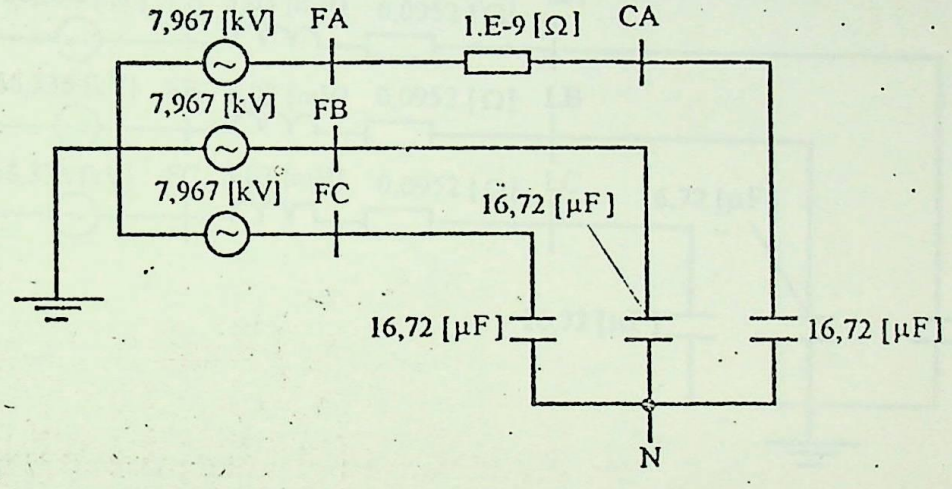
Escola de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
BIM
de Irajubá - EFEI



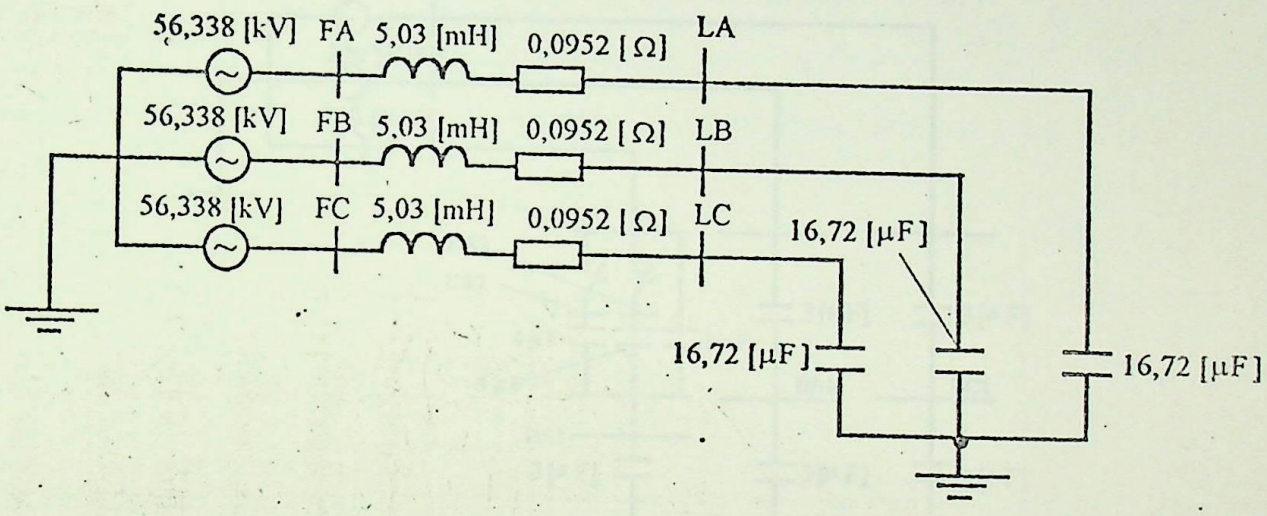
ANEXO 6


PP
7,967 [kV]
FA
0,0061 [mH]
0,0023[Ω]
LA
0,0148 [mH]
0,0043 [Ω]
CA
7,967 [kV]
FB
0,0061 [mH]
0,0023[Ω]
LB
0,0148 [mH]
0,0043 [Ω]
CB
7,967 [kV]
FC
0,0061 [mH]
0,0023[Ω]
LC
0,0148 [mH]
0,0043 [Ω]
CC
0,1 [Ω]
1,3 [mH]
PN

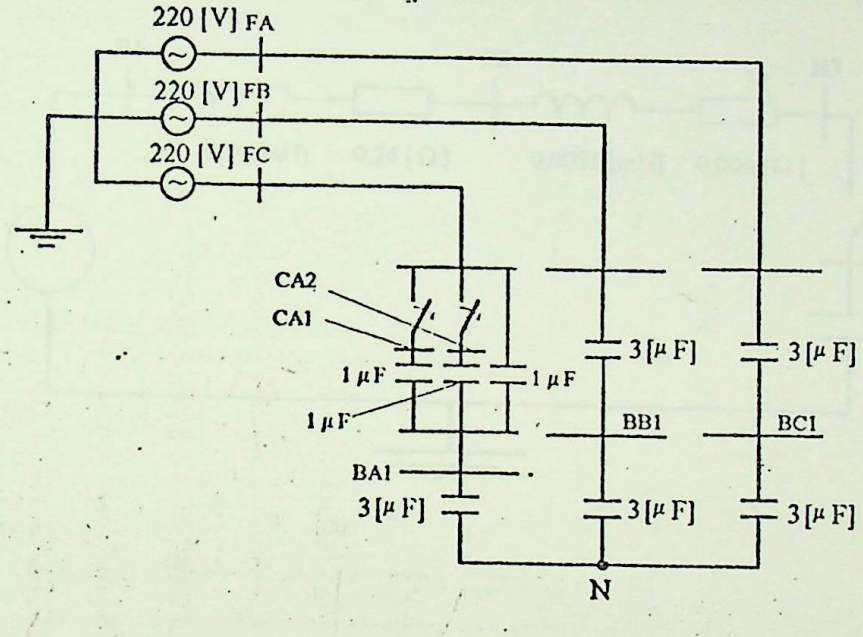
ANEXO 7



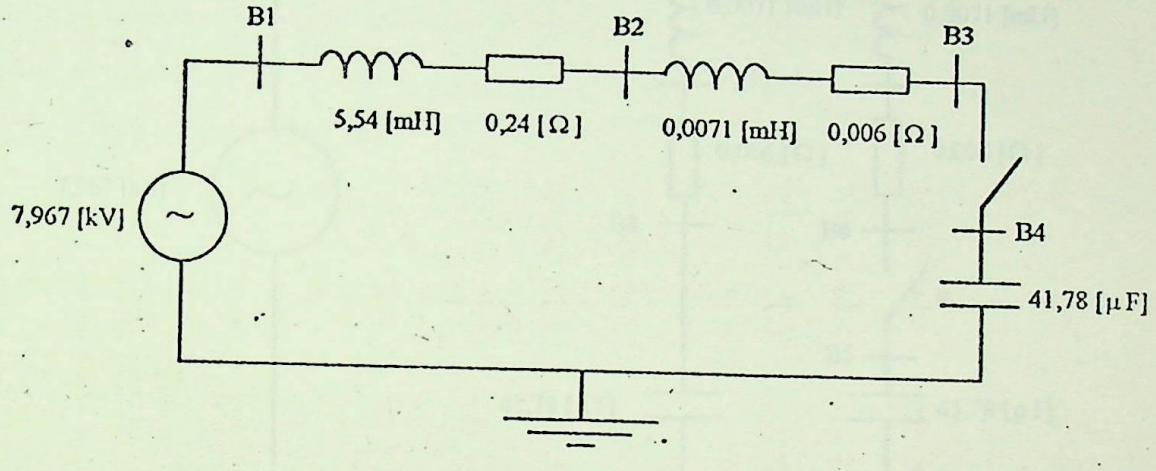
ANEXO 8


56,338 [kV]
FA
5,03 [mH]
0,0952 [Ω]
LA
56,338 [kV]
FB
5,03 [mH]
0,0952 [Ω]
LB
56,338 [kV]
FC
5,03 [mH]
0,0952 [Ω]
LC
16,72 [μF]
16,72 [μF]
16,72 [μF]

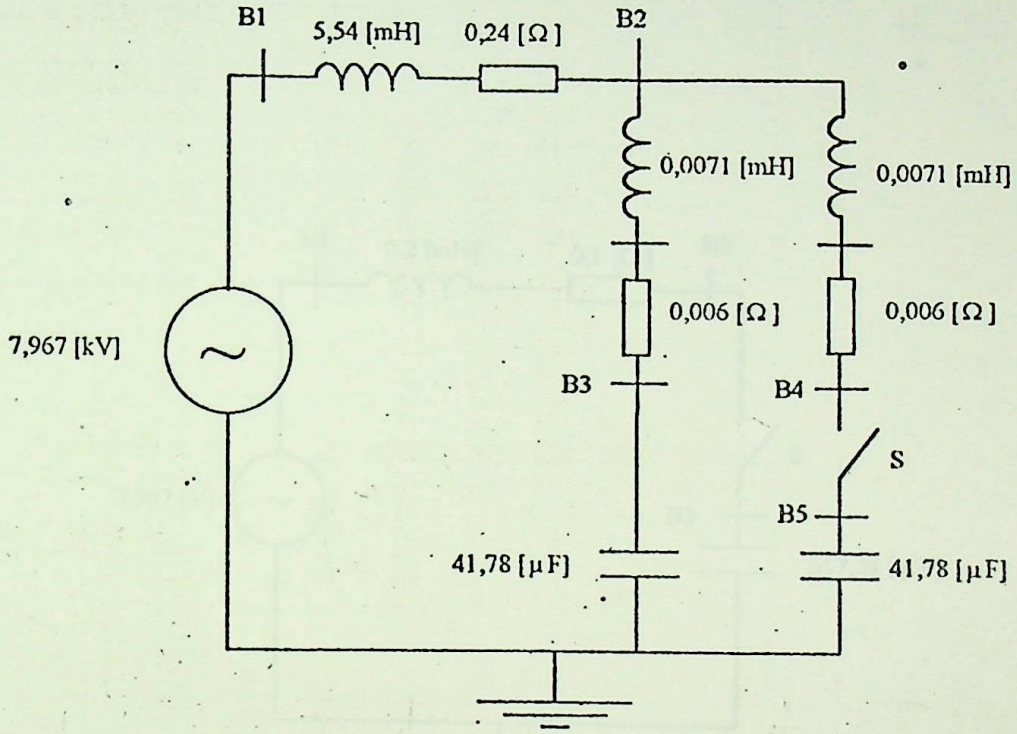
ANEXO 9


220 [V] FA
220 [V] FB
220 [V] FC
CA2
CA1
1 μF
1 μF
1 μF
3 [μ F]
3 [μ F]
BB1
BC1
BA1
3 [μ F]
3 [μ F]
3 [μ F]
N

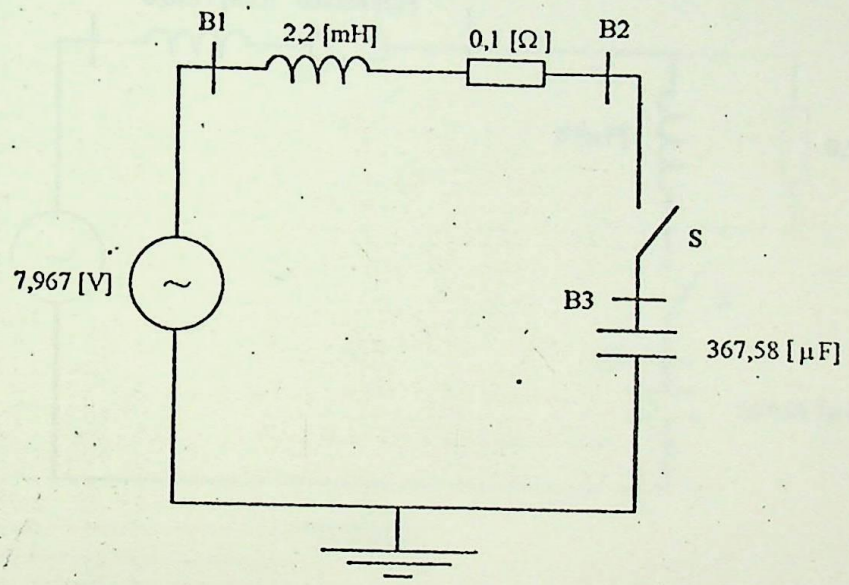
ANEXO 10



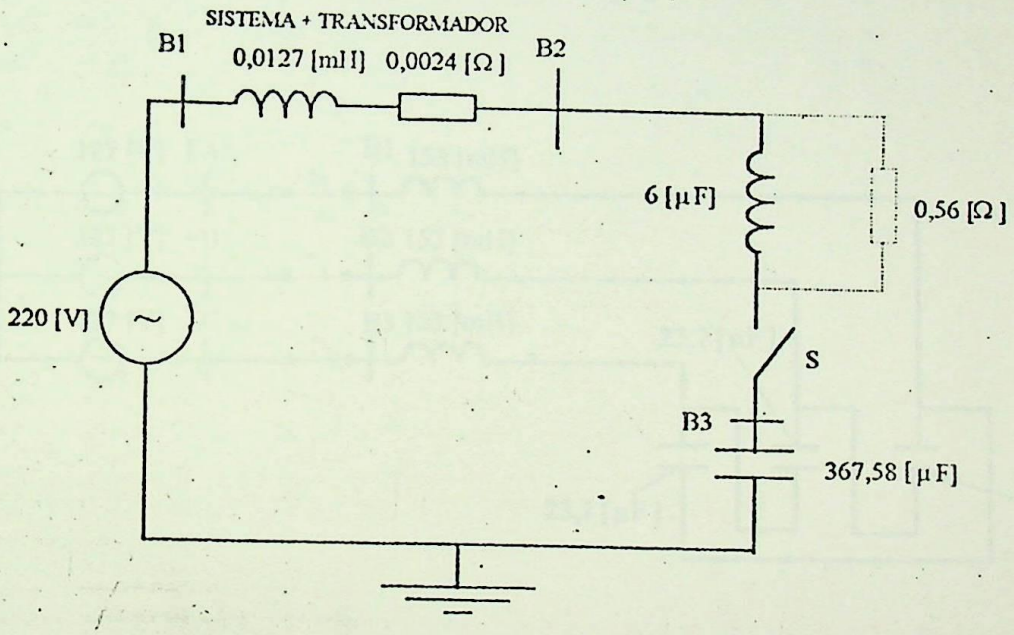
ANEXO 11


B1
5,54 [mH]
0,24 [Ω]
B2
0,0071 [mH]
0,0071 [mH]
0,006 [Ω]
0,006 [Ω]
7,967 [kV]
B3
B4
S
B5
41,78 [μF]
41,78 [μF]

ANEXO 12

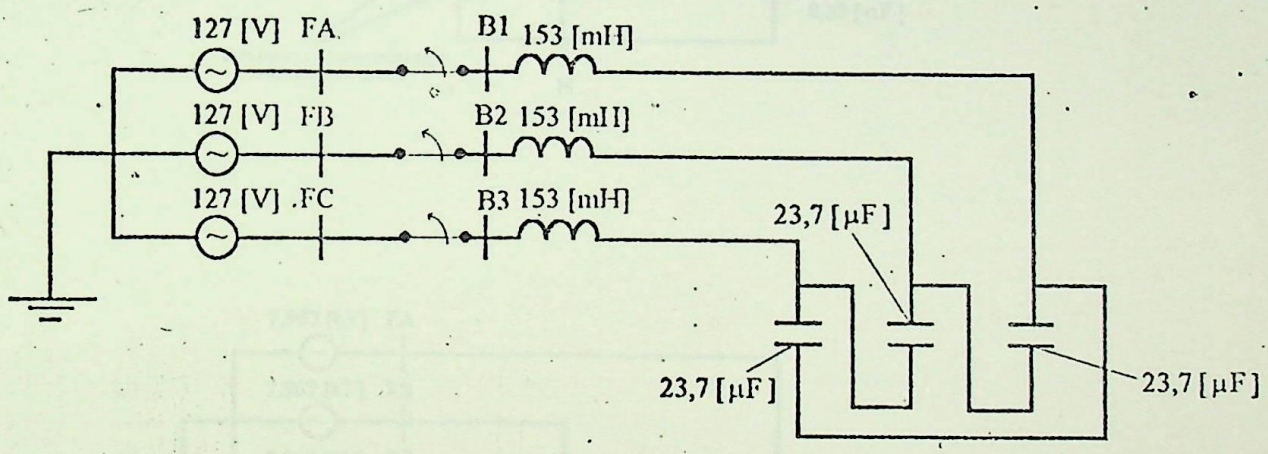


ANEXO 13

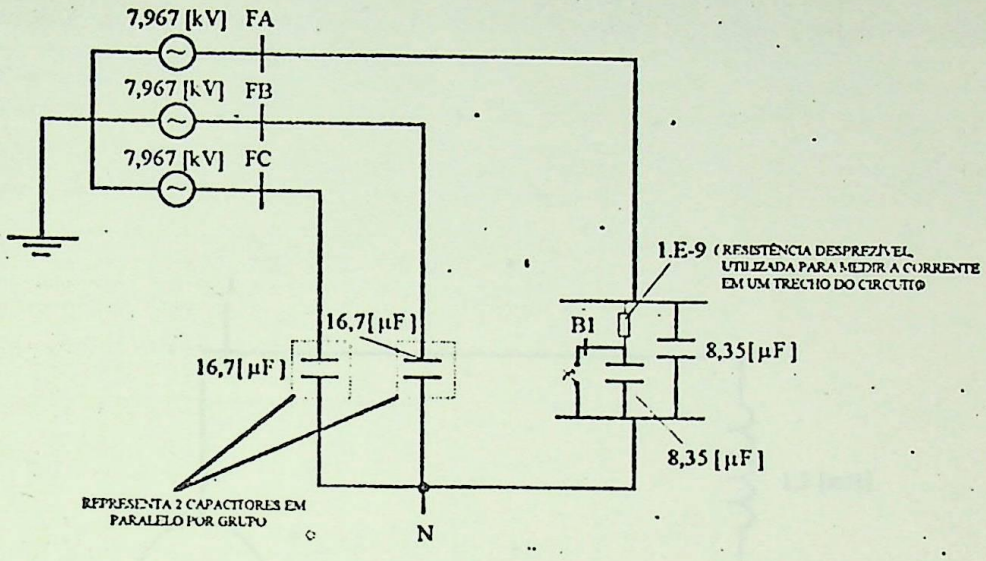


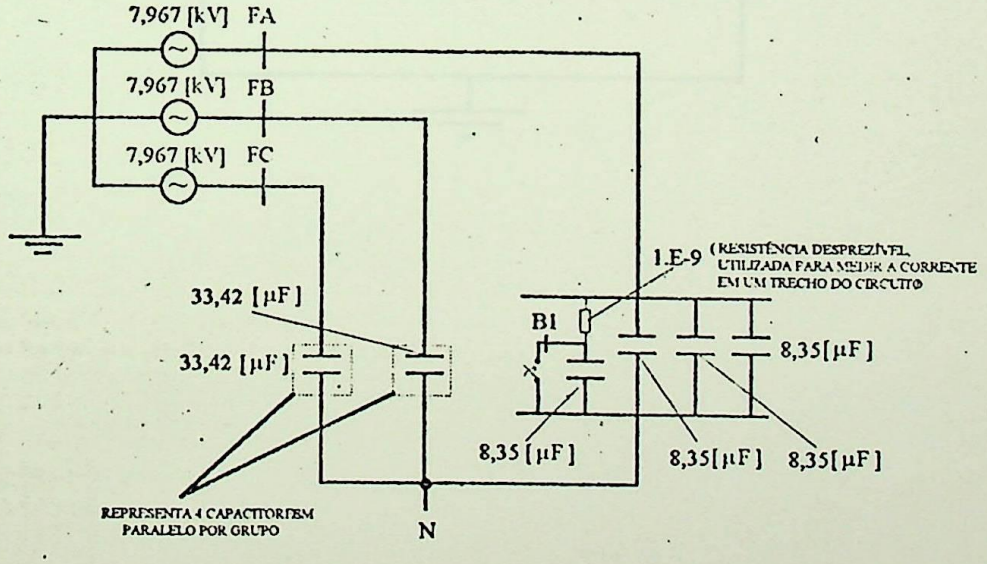
ANEXO 14

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

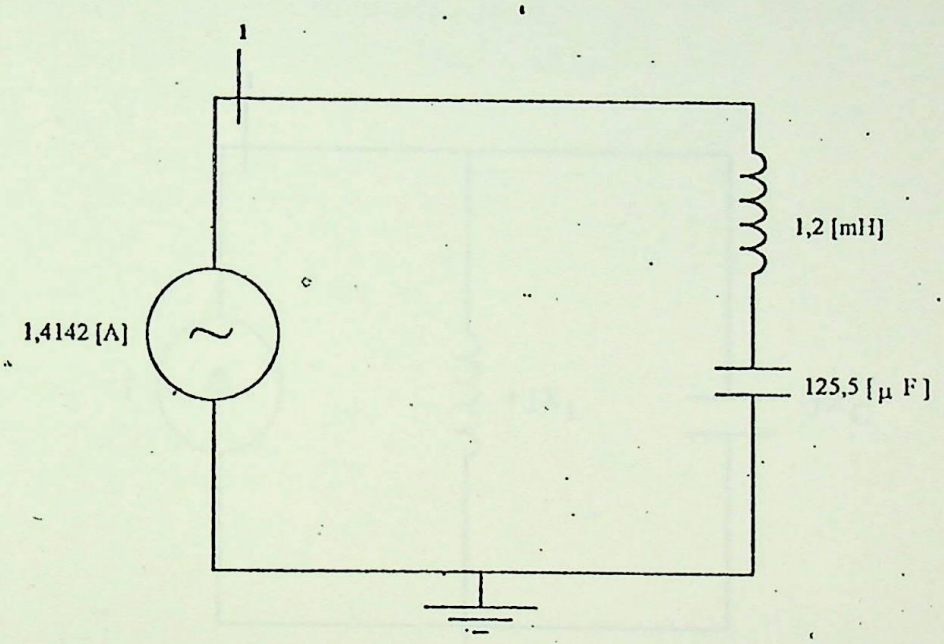

127 [V] FA
B1 153 [mH]
127 [V] FB
B2 153 [mH]
127 [V] FC
B3 153 [mH]
23,7 [μF]
23,7 [μF]
23,7 [μF]

ANEXO 15

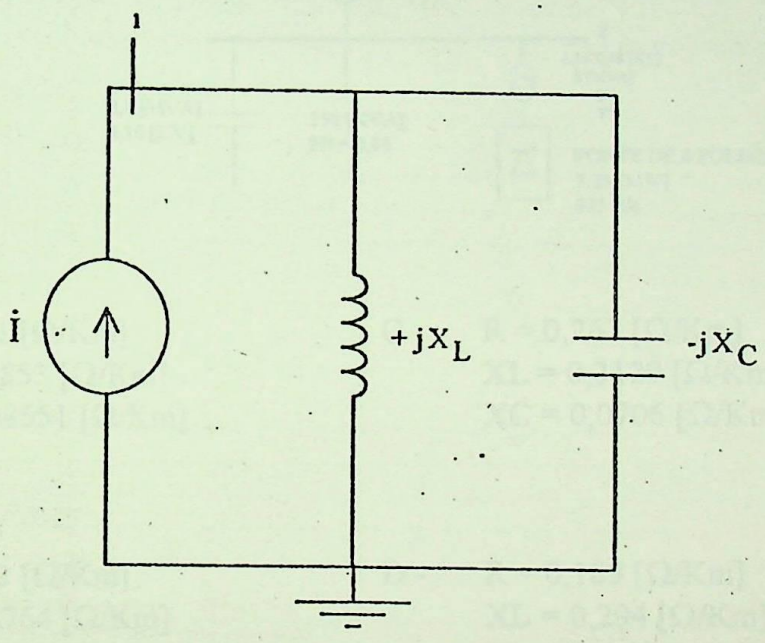

7,967 [kV] FA
7,967 [kV] FB
7,967 [kV] FC
1.E-9 (RESISTÊNCIA DESPREZÍVEL, UTILIZADA PARA MEDIR A CORRENTE EM UM TRECHO DO CIRCUITO
16,7[µF]
16,7[µF]
B1
8,35[µF]
8,35 [µF]
REPRESENTA 2 CAPACITORES EM PARALELO POR GRUPO
N


7,967 [kV] FA
7,967 [kV] FB
7,967 [kV] FC
1.E-9 (RESISTÊNCIA DESPREZÍVEL, UTILIZADA PARA MEDIR A CORRENTE EM UM TRECHO DO CIRCUITO
33,42 [µF]
33,42 [µF]
B1
8,35[µF]
8,35 [µF]
8,35[µF]
8,35[µF]
REPRESENTA 4 CAPACITORES EM PARALELO POR GRUPO
N

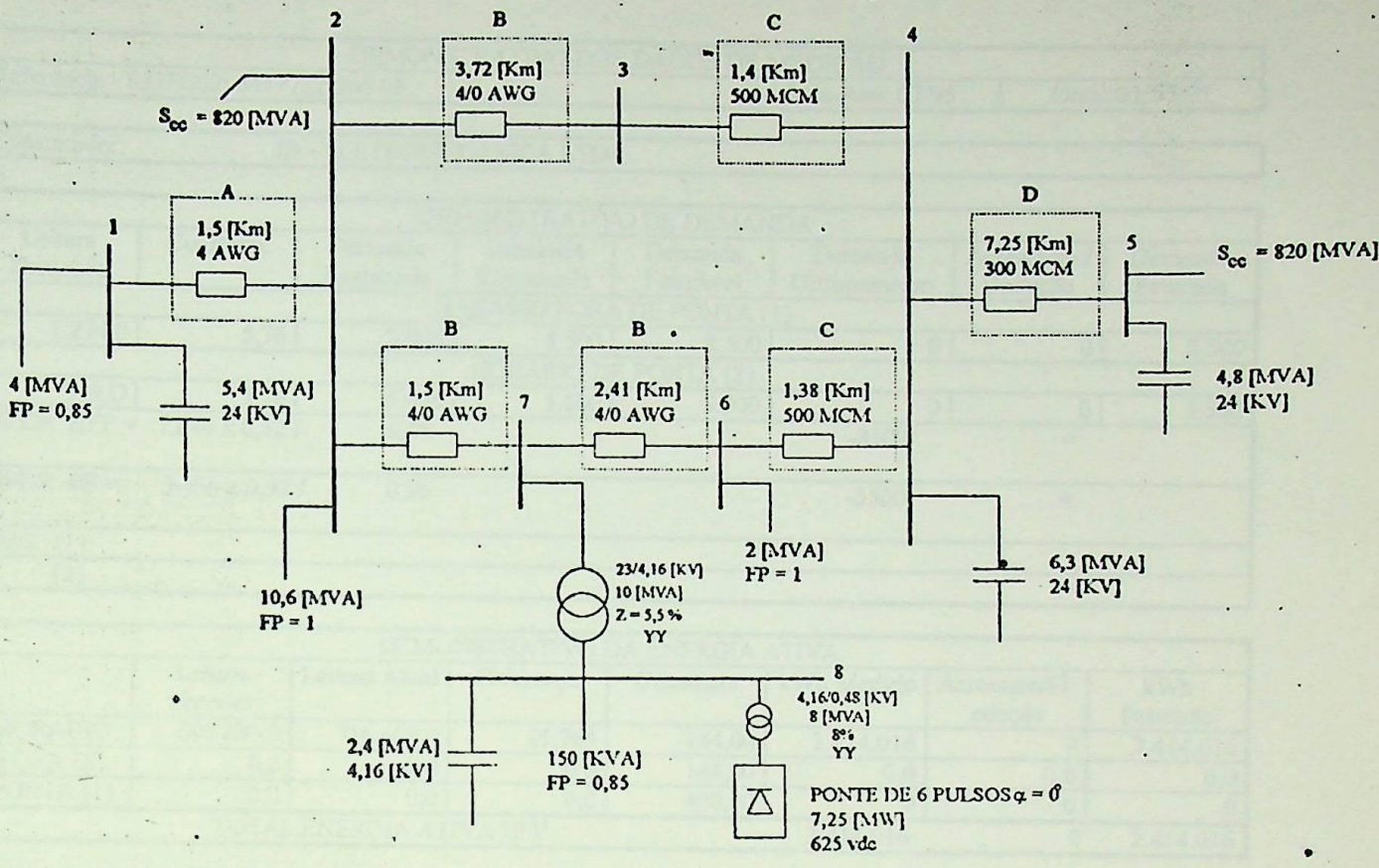
ANEXO 16



ANEXO 17



ANEXO 18



A - R = 1,351 [Ω/Km]
XL = 0,3853 [Ω/Km]
XC = 0,08551 [Ω/Km]

B - R = 0,113 [Ω/Km]
XL = 0,2764 [Ω/Km]
XC = 0,06525 [Ω/Km]

C - R = 0,267 [Ω/Km]
XL = 0,3129 [Ω/Km]
XC = 0,0706 [Ω/Km]

D - R = 0,189 [Ω/Km]
XL = 0,294 [Ω/Km]
XC = 0,06712 [Ω/Km]

AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE NO BARRAMENTO 8	
ORDEM DO HARMÔNICO	PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
5	17,95
7	11,48
11	5,19
13	3,48
17	1,59
19	1,20
CORRENTE NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL = 1038 [A]	

ANEXO 19

DEMONSTRATIVO DOS DADOS DE MEDIÇÃO		
Referência - RE/FG02: 8459732-086-08	Mês-Ano: 07/95	Data: 03/07/95

Consumidor: JB - ELETROMECANICA LTDA

DEMONSTRATIVO DE DEMANDA

Leitura Demanda	Constante	Demanda Registrada	Demanda Contratada	Demanda Faturável	Demanda Ultrapassagm	Acréscimo / Dedução	Demanda Faturada
HARÁRIO FORA DE PONTA (1)							
1.274,0	5,76	7.045	8.500	8.500	0	0	8.500
HORÁRIO DE PONTA (2)							
949,O	5,76	5,466	5.500	5.500	0	0	5.500

UFDR HFP = 7.044 x 0,92 / 0,96 -8500 =
0

UFDR HF = 5.466 x 0,92 / 0,96 -5500 =
0

OBS.: (1)
(2)

DEMONSTRATIVO DA ENERGIA ATIVA

	Leitura Anterior	Leitura Atual	Diferença	Constante	kWh Medido	Acréscino/Dedução	kWh Faturado
HORÁRIO	699.845,0	716.609,0	16,764	144,00	2.414.016	0	2.414.016
FORA DE	0,0	0,0	0,0	144,00	0,0	0,0	0,0
PONTA (1)	0,0	0,0	0,0	400,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HFP :					2.414.016	0	2.414.016
HORÁRIO	699.845,0	716.609,0	16,764	1,44	262.904	0	262.904
PONTA (2)	0,0	0,0	0,0	1,44	0	0	2.414.016
	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HP :					262.904	0	2.414.016

OBS.: (1)
(2)

N. do(s) Medidor(es): 30.100.124 30.914.517 F. Carga HFP 0,524 F. Carga HP 0,729

DEMONSTRATIVO DA ENERGIA REATIVA

	Leitura Anterior	Leitura Atual	Diferença	Constante	kWh Medido	Acréscino / Dedução	kWh Faturado
HORÁRIO	228.638,0	233.749,0	5.111,0	144,00	735.984	(318)	735.666
FORA DE	0,0	0,0	0,0	144,00	0,0	0,0	0,0
PONTA (1)	0,0	0,0	0,0	400,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HFP :					735.984	(318)	
735.666							
HORÁRIO	192.113,0	247.345,0	55.232,0	1,44	79.534	0	79.534
PONTA (2)	0,0	0,0	0,0	1,44	0	0	0
	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HP :					79.543	0	
79.534							

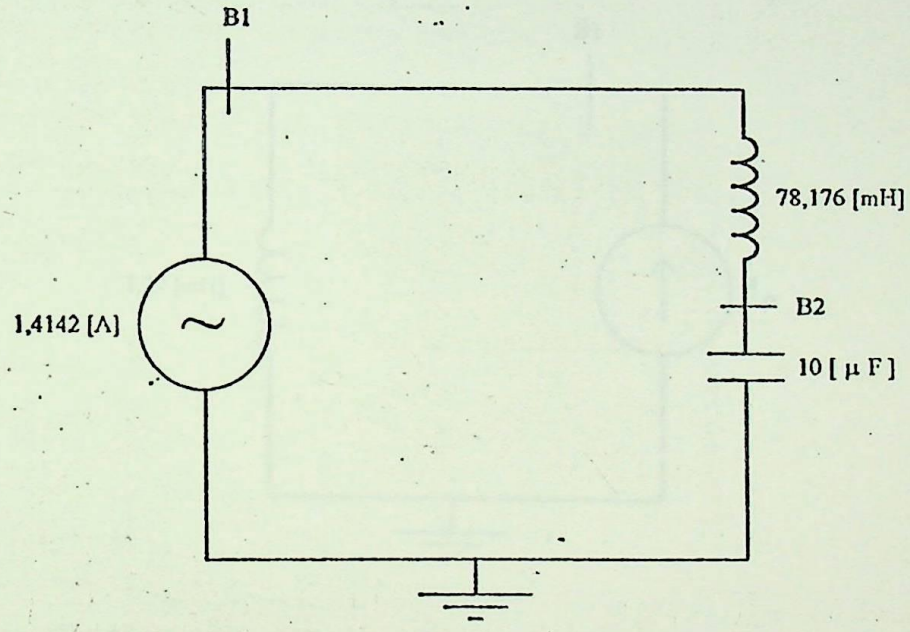
UFDR HFP = 7.044 x 0,92 / 0,96 -1 =
0

UFDR HF = 5.466 x 0,92 / 0,96 -1 =
0

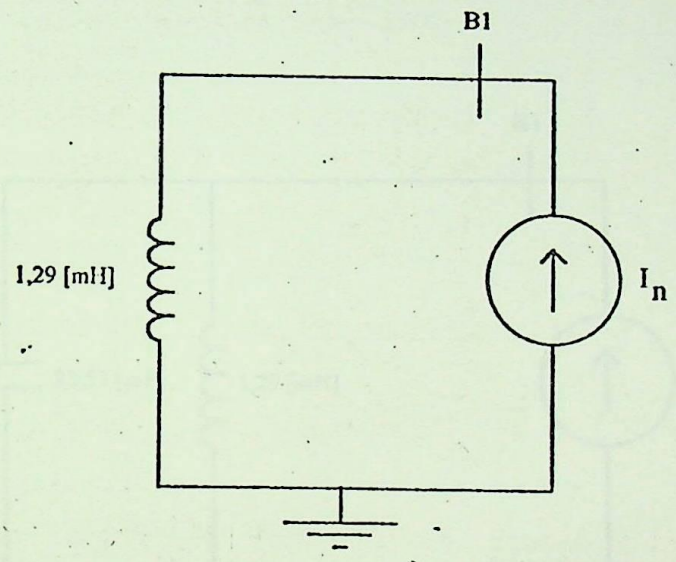
OBS.: (1)
(2)

N. do(s) Medidor (es): 30.100.124 30.914.518 F. Pot. HFP 0,96 F. Pot HP 0,96

ANEXO 20

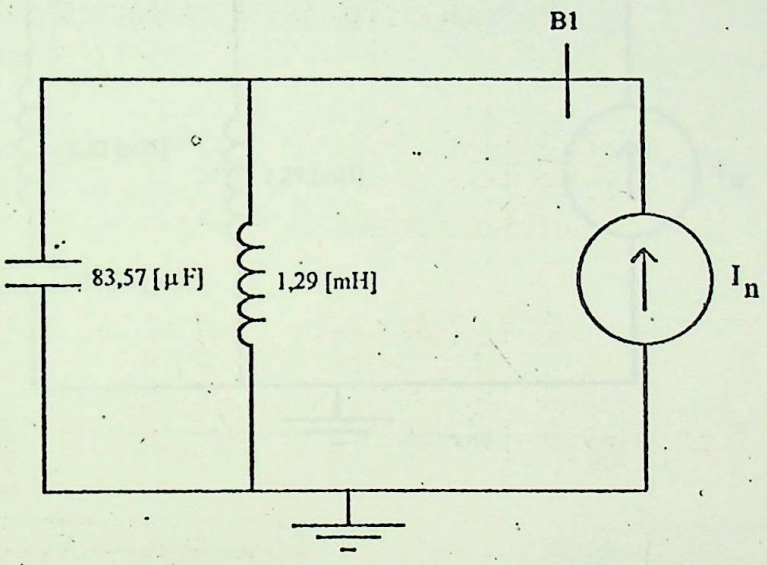


ANEXO 21

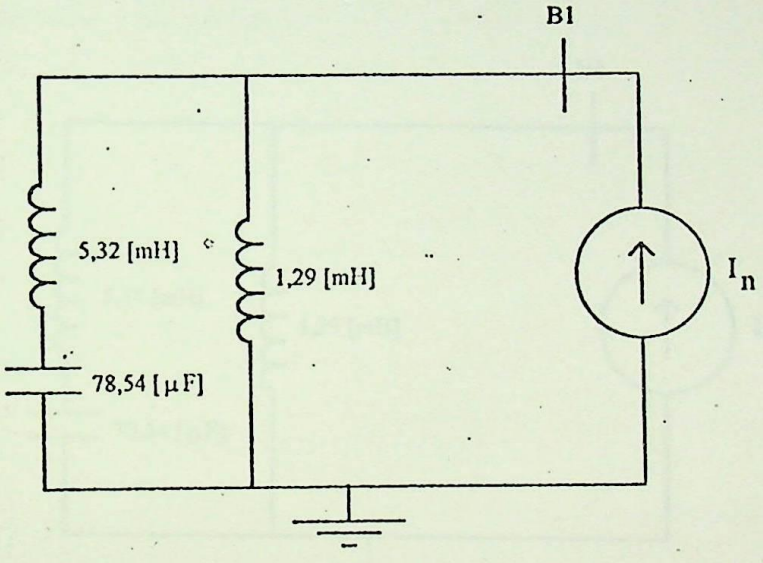


ANEXO 22

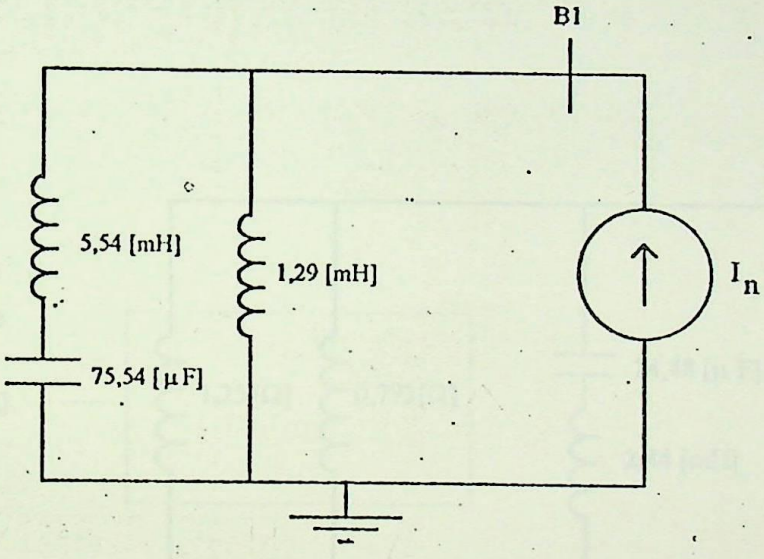
Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM



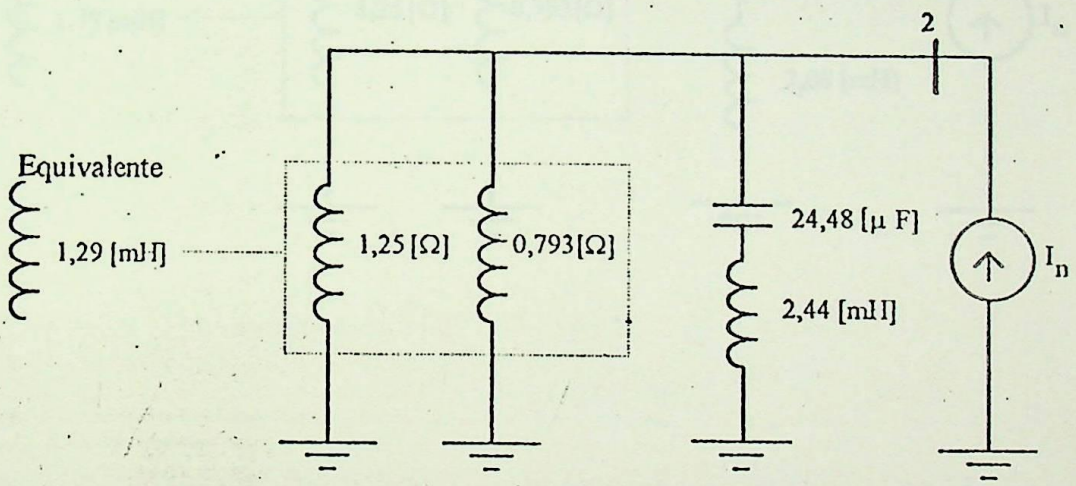
ANEXO 23



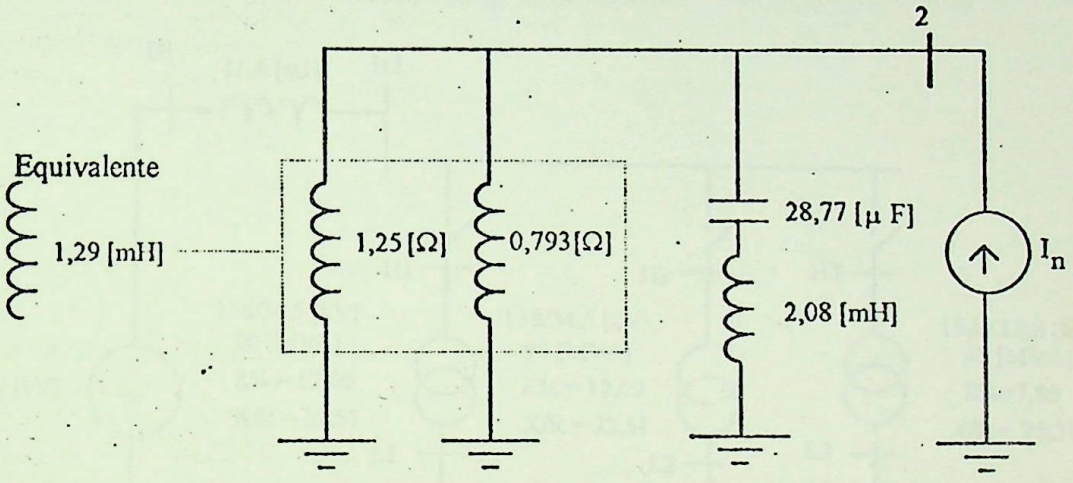
ANEXO 24



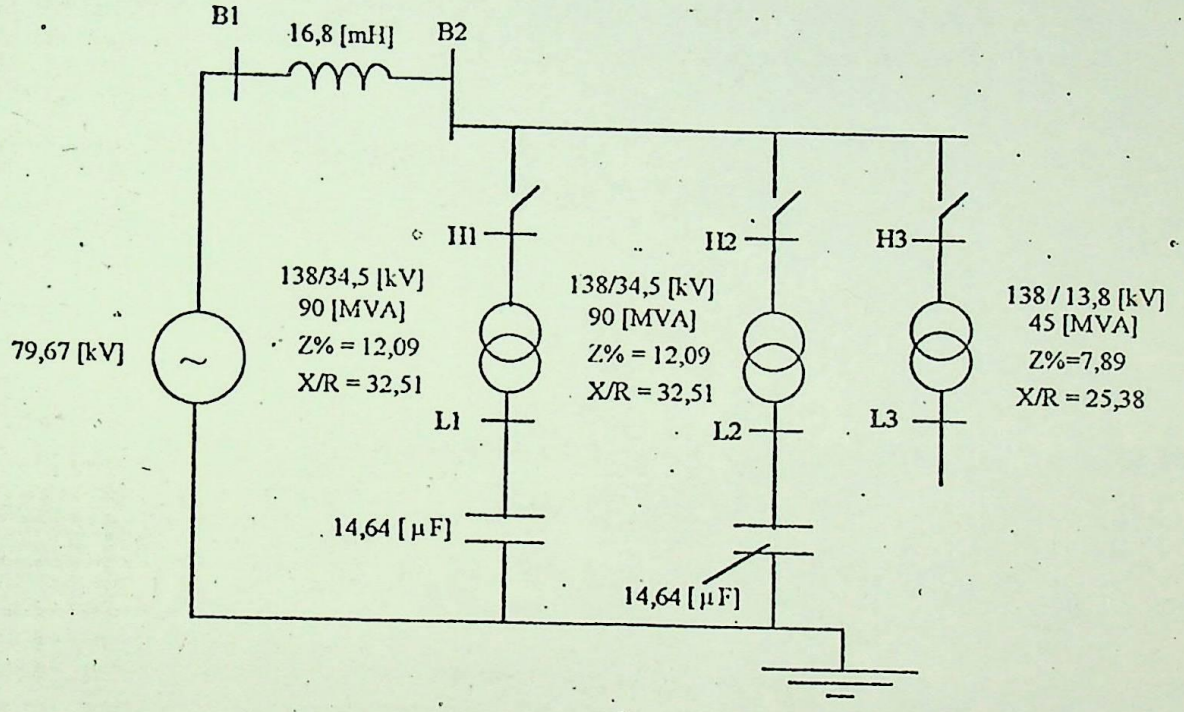
ANEXO 25



ANEXO 26



ANEXO 27

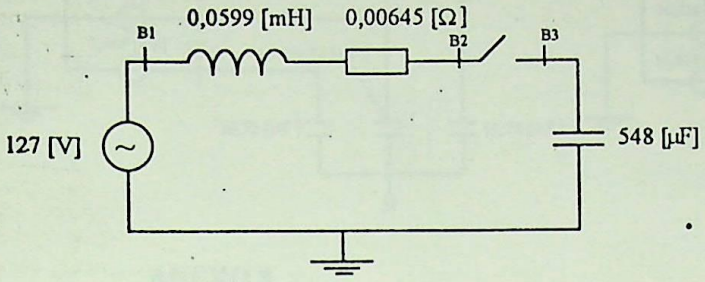

B1
16,8 [mH]
B2
H1
H2
H3
138/34,5 [kV]
90 [MVA]
Z% = 12,09
X/R = 32,51
138/34,5 [kV]
90 [MVA]
Z% = 12,09
X/R = 32,51
138 / 13,8 [kV]
45 [MVA]
Z%=7,89
X/R = 25,38
79,67 [kV]
L1
L2
L3
14,64 [μF]
14,64 [μF]

ANEXO 28

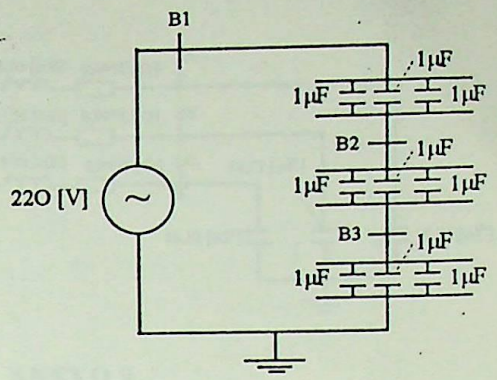
ANEXOS 1 A 29

DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA E ARQUIVO DE DADOS UTILIZADOS

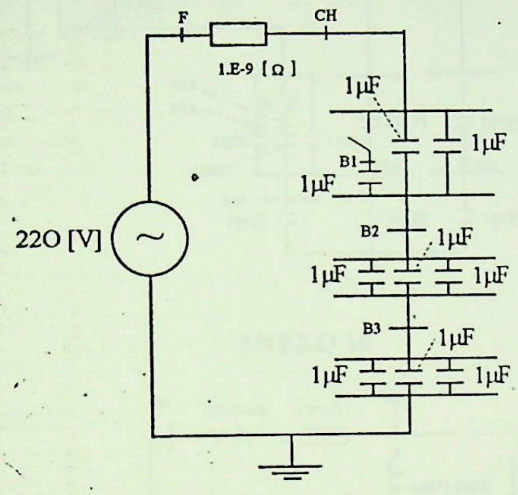
Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM



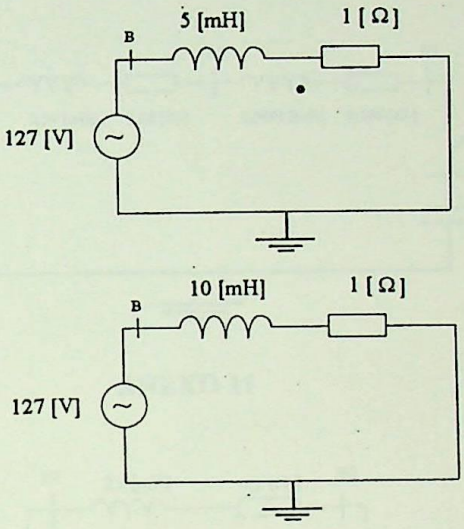
ANEXO 1



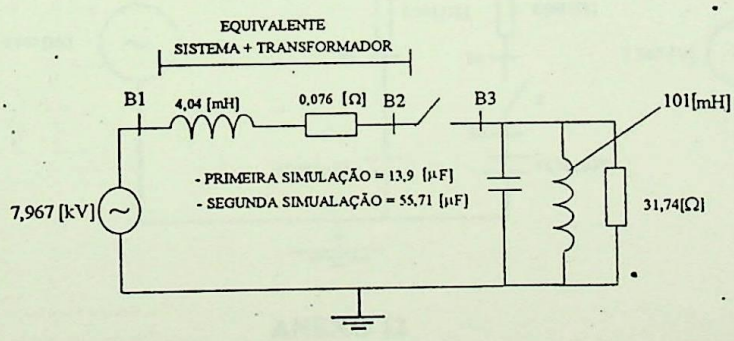
ANEXO 2



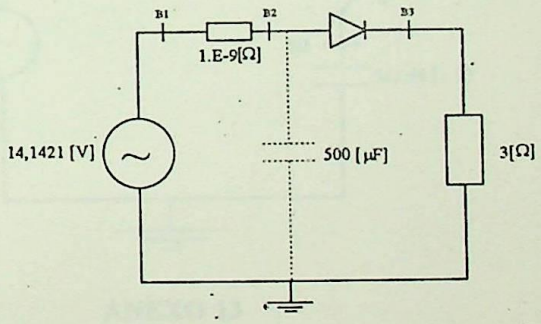
ANEXO 3



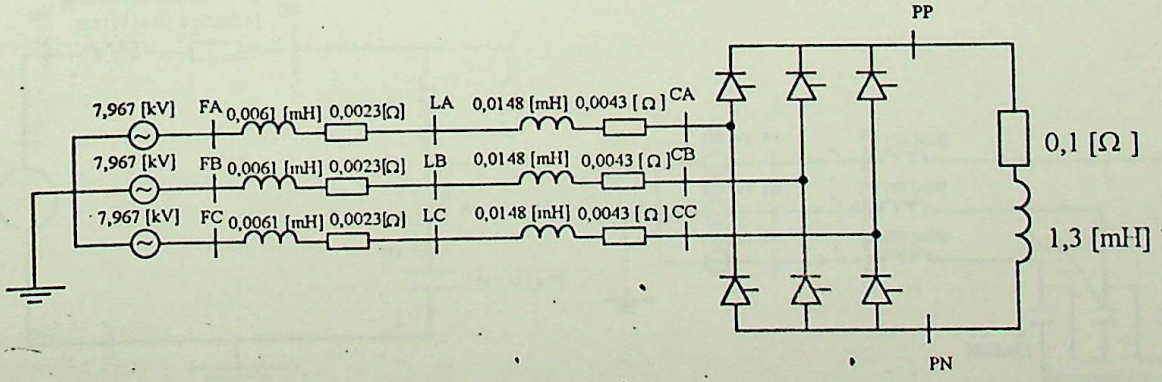
ANEXO 4



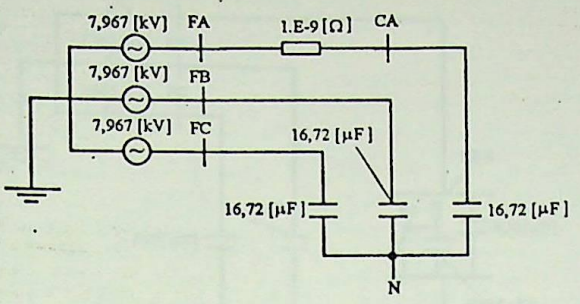
ANEXO 5



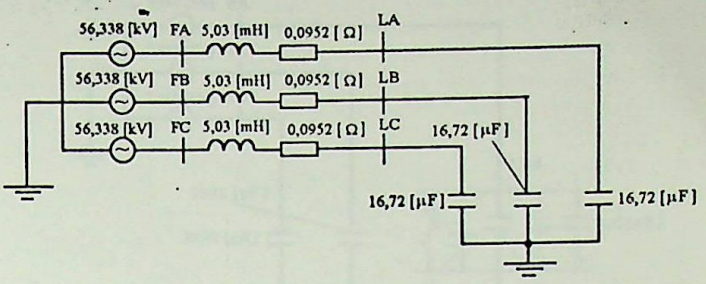
ANEXO 6



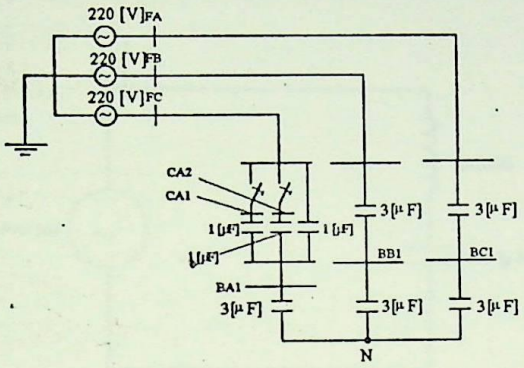
ANEXO 7



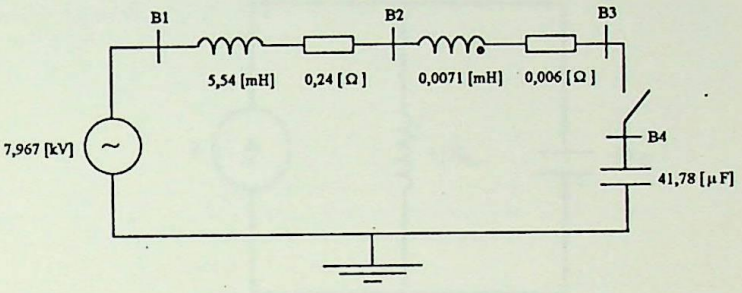
ANEXO 8



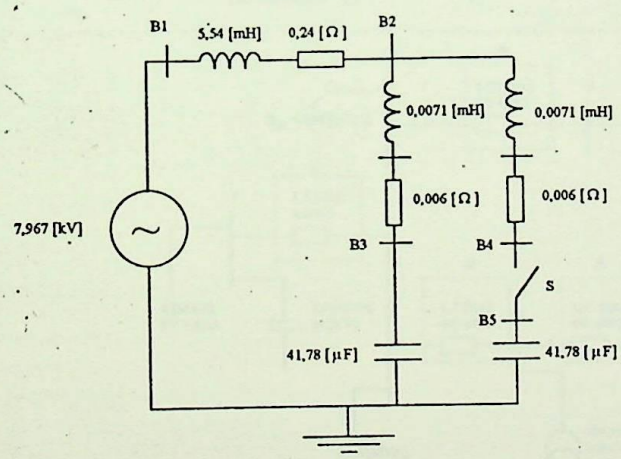
ANEXO 9



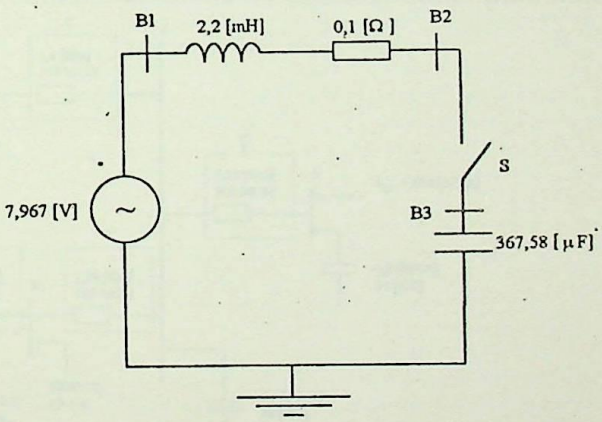
ANEXO 10



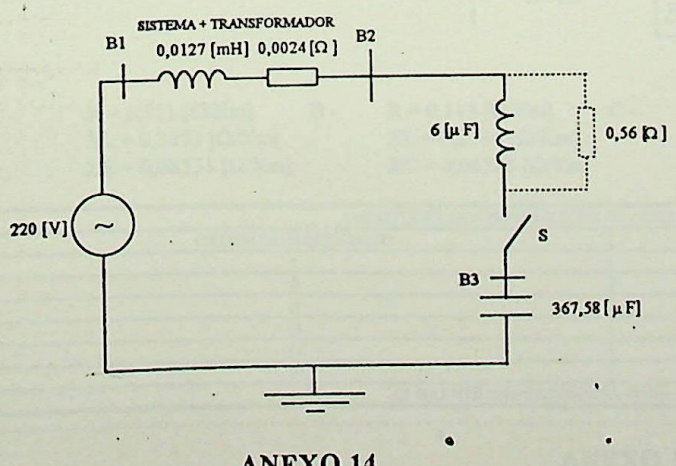
ANEXO 11



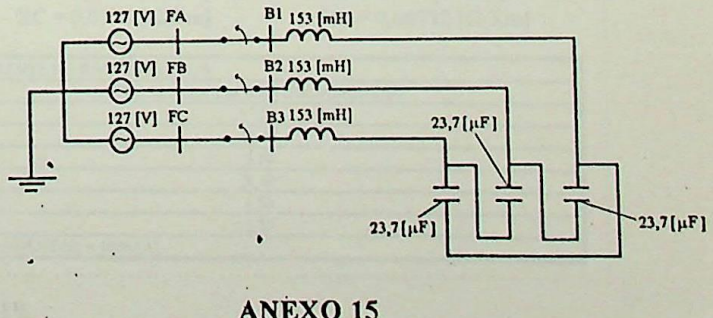
ANEXO 12



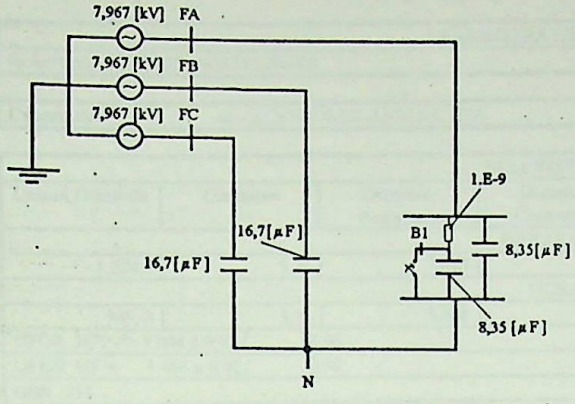
ANEXO 13

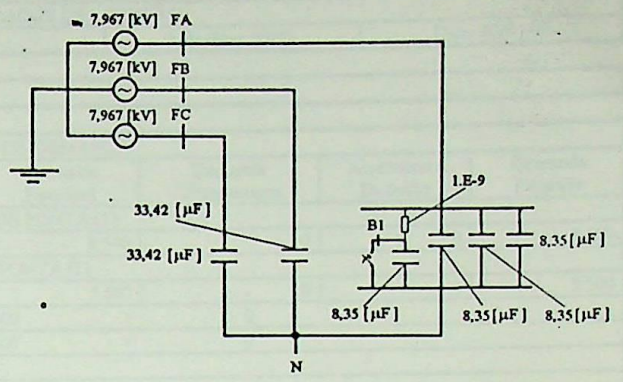


ANEXO 14

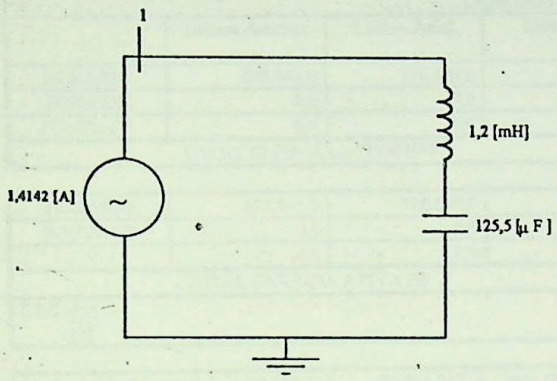


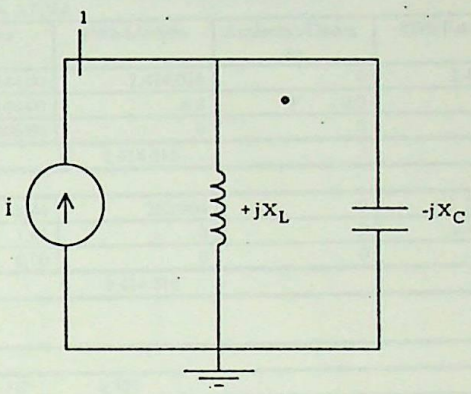
ANEXO 15



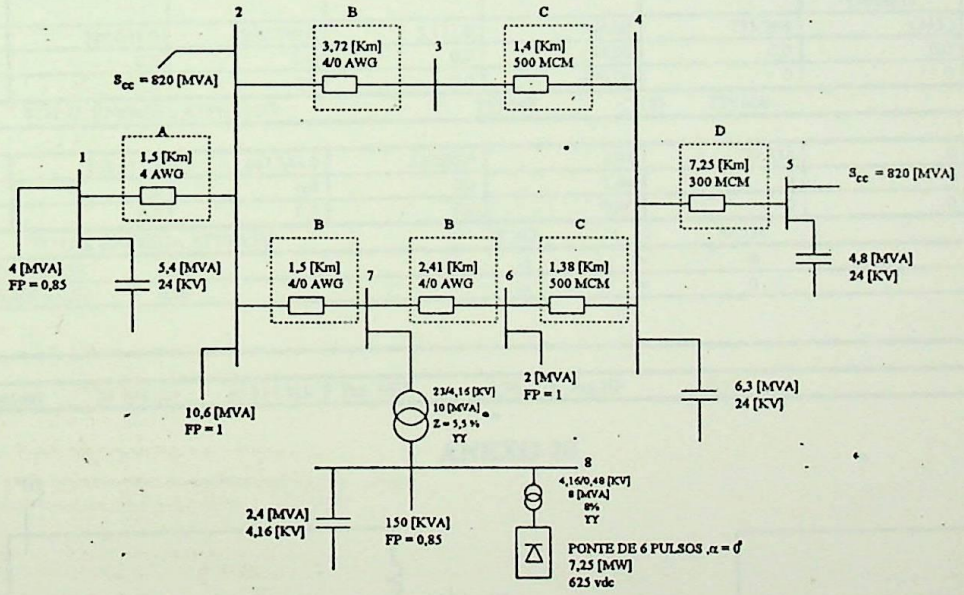


ANEXO 16





ANEXO 17 **ANEXO 18**



A R = 1,351 [Ω/Km] B - R = 0,113 [Ω/Km] C - R = 0,267 [Ω/Km] D - R = 0,189 [Ω/Km]
XL = 0,3853 [Ω/Km] XL = 0,2764 [Ω/Km] XL = 0,3129 [Ω/Km] XL = 0,294 [Ω/Km]
XC = 0,08551 [Ω/Km] XC = 0,06525 [Ω/Km XC = 0,0706 [Ω/Km] XC = 0,06712 [Ω/Km]

AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE NO BARRAMENTO 8	
ORDEM DO HARMÔNICO	PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
5	17,95
7	11,48
11	5,19
13	3,48
17	1,59
19	1,20
CORRENTE NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL = 1038 [A]	

ANEXO 19

DEMONSTRATIVO DOS DADOS DE MEDIÇÃO		
Referência - RE/FG02: 8459732-086-08	Mês-Ano: 07/95	Data: 03/07/95

Consumidor: JB - ELETROMECANICA LTDA

DEMONSTRATIVO DE DEMANDA

Leitura Demanda	Constante	Demanda Registrada	Demanda Contratada	Demanda Faturável	Demanda Ultrapassagm	Acréscimo / Dedução	Demanda Faturada
HARÁRIO FORA DE PONTA (1)							
1.274,0	5,76	7.045	8.500	8.500	0	0	8.500
HORÁRIO DE PONTA (2)							
949,0	5,76	5.466	5.500	5.500	0	0	5.500

UFDR HFP = 7.044 x 0,92 / 0,96 -8500 = 0

UFDR HF = 5.466 x 0,92 / 0,96 -5500 = 0

OBS.: (1)
(2)

DEMONSTRATIVO DA ENERGIA ATIVA

	Leitura Anterior	Leitura Atual	Diferença	Constante	kWh Medido	Acréscino/Deduç ão	kWh Faturado
HORÁRIO	699.845,0	716.609,0	16,764	144,00	2.414.016	0	2.414.016
FORA DE	0,0	0,0	0,0	144,00	0,0	0,0	0,0
PONTA (1)	0,0	0,0	0,0	400,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HFP :				2.414.016	0	2.414.016	
HORÁRIO	699.845,0	716.609,0	16,764	1,44	262.904	0	262.904
PONTA (2)	0,0	0,0	0,0	1,44	0	0	2.414.016
	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HP :				262.904	0	2.414.016	

OBS.: (1)
(2)

N. do(s) Medidor(es): 30.100.124 30.914.517 F. Carga HFP 0,524 F. Carga HP 0,729

DEMONSTRATIVO DA ENERGIA REATIVA

	Leitura Anterior	Leitura Atual	Diferença	Constante	kWh Medido	Acréscino / Dedução	kWh Faturado
HORÁRIO	228.638,0	233.749,0	5.111,0	144,00	735.984	(318)	735.666
FORA DE	0,0	0,0	0,0	144,00	0,0	0,0	0,0
PONTA (1)	0,0	0,0	0,0	400,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HFP :				735.984	(318)	735.666	
HORÁRIO	192.113,0	247.345,0	55.232,0	1,44	79.534	0	79.534
PONTA (2)	0,0	0,0	0,0	1,44	0	0	0
	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0	0
TOTAL ENERGIA ATIVA HP :				79.543	0	79.534	

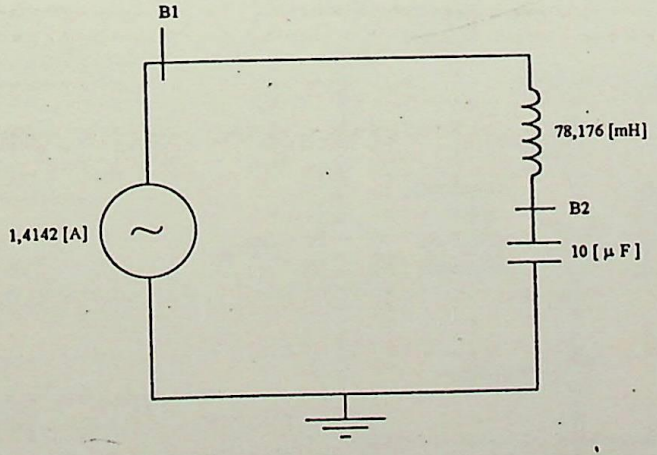
UFDR HFP = 7.044 x 0,92 / 0,96 -1 = 0

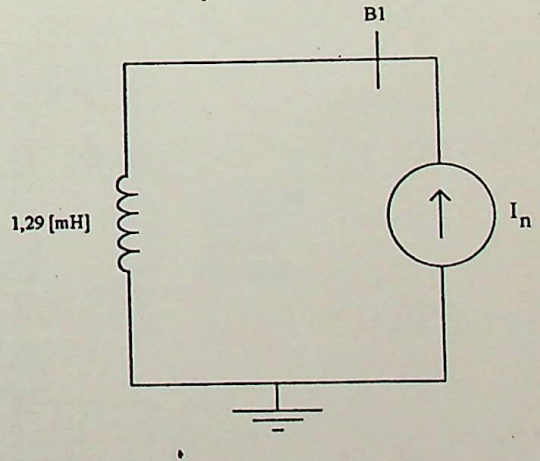
UFDR HF = 5.466 x 0,92 / 0,96 -1 = 0

OBS.: (1)
(2)

N. do(s) Medidor (es): 30.100.124 30.914.518 F. Pot. HFP 0,96 F. Pot HP 0,96

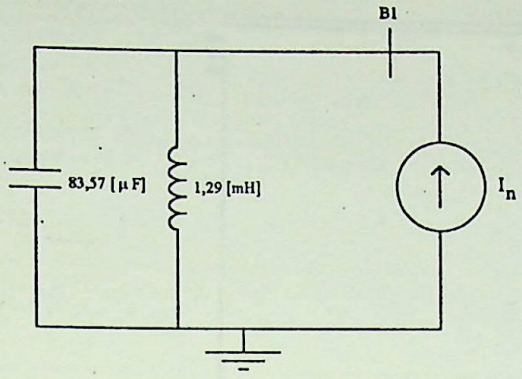
ANEXO 20



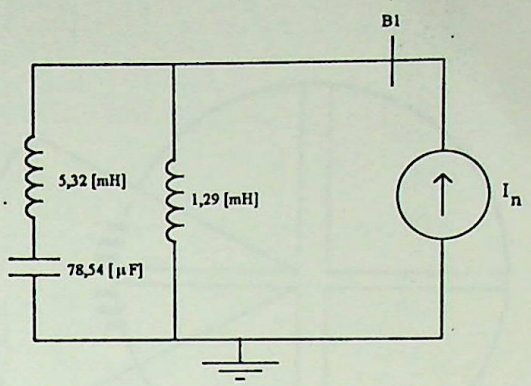


ANEXO 21

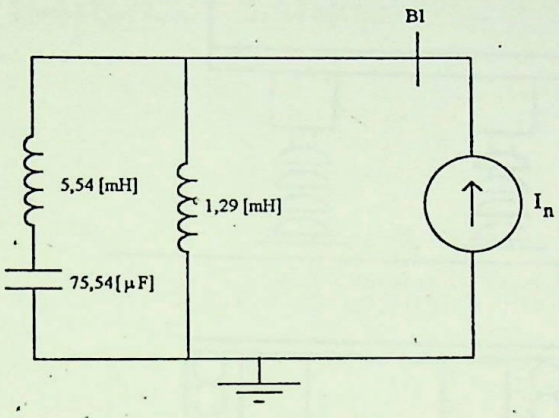
ANEXO 22



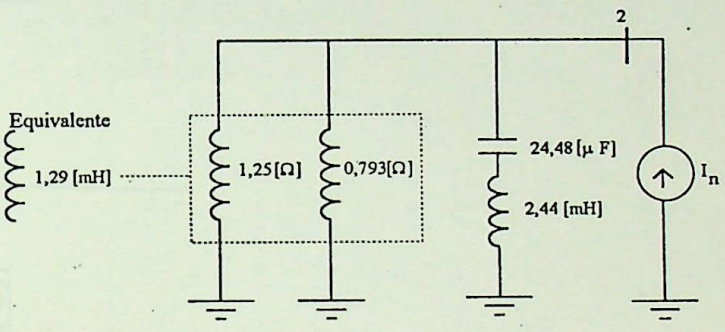
ANEXO 23



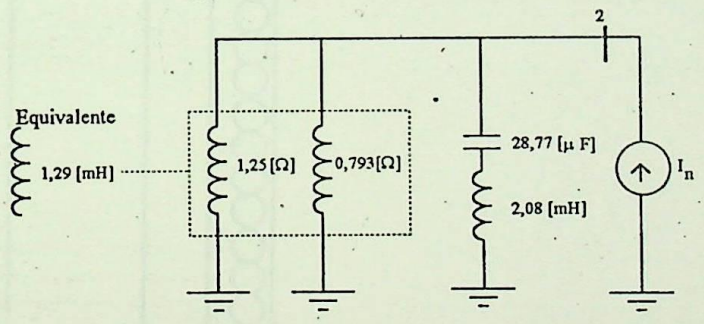
ANEXO 24



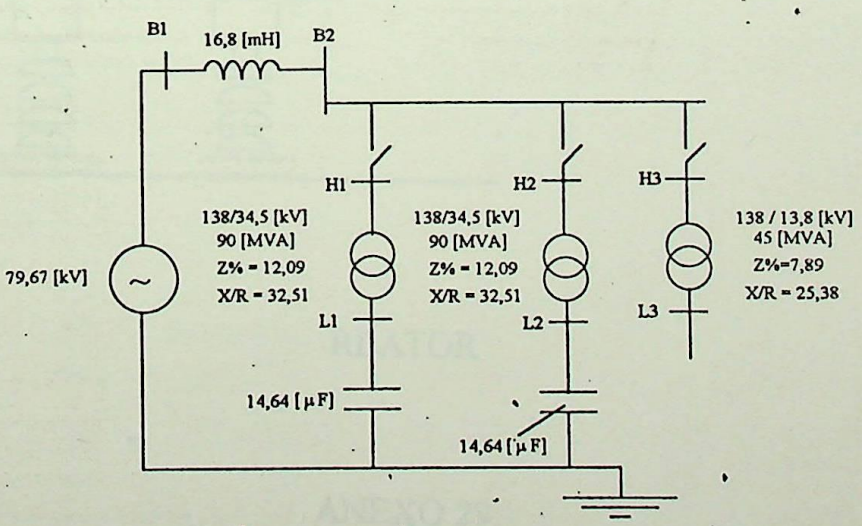
ANEXO 25



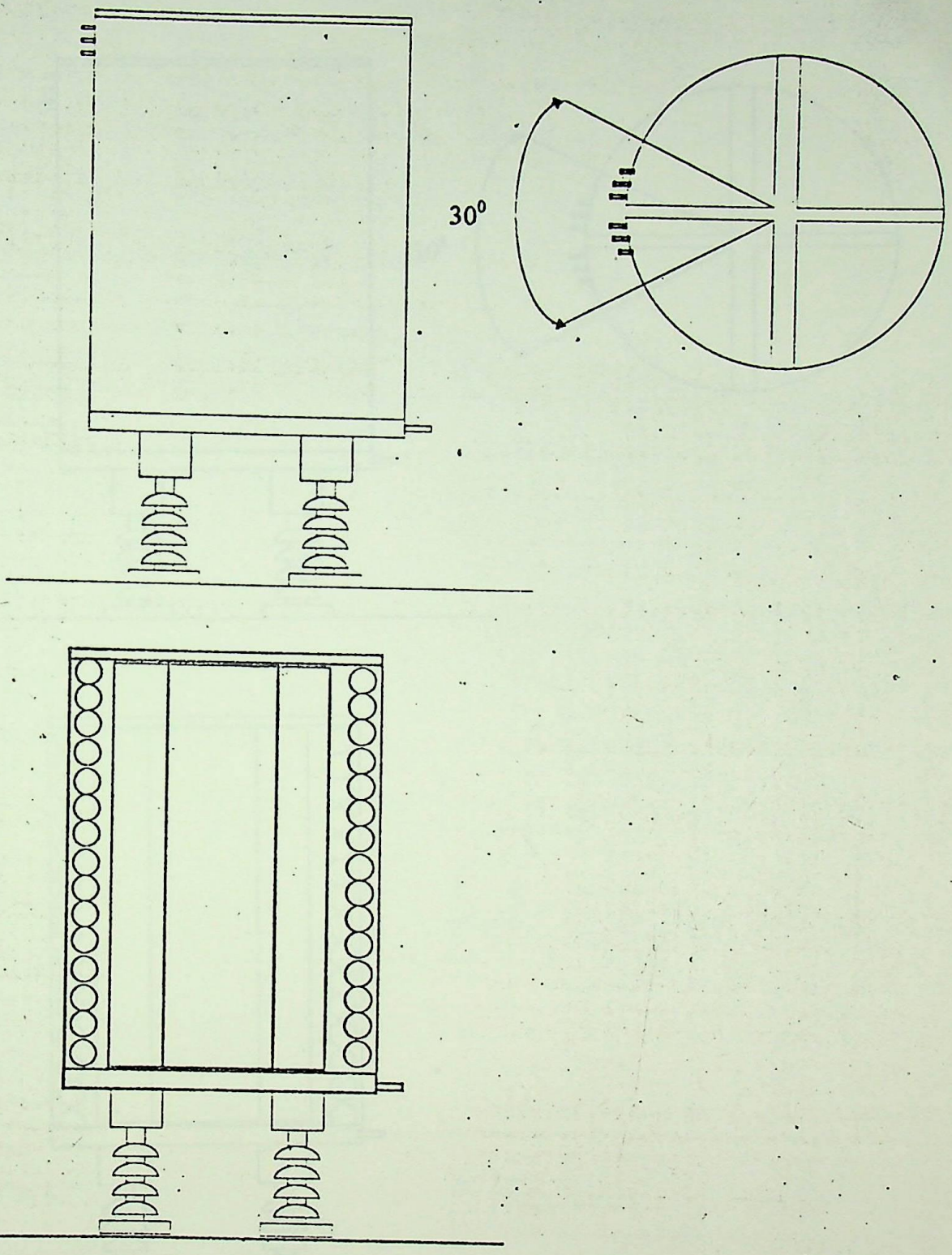
ANEXO 26



ANEXO 27

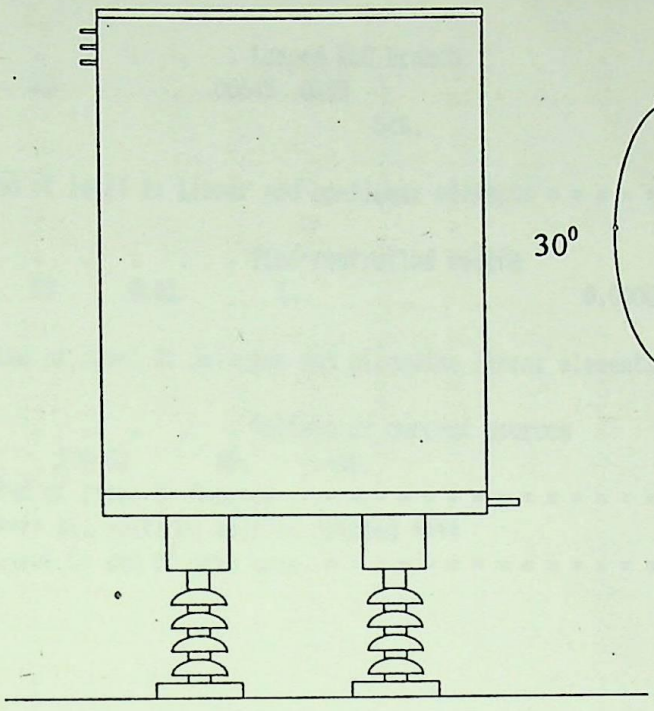


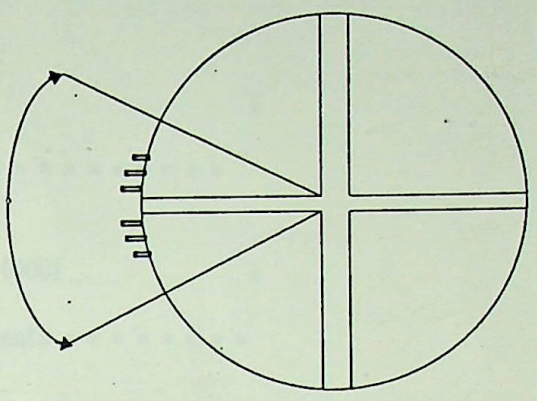
ANEXO 28

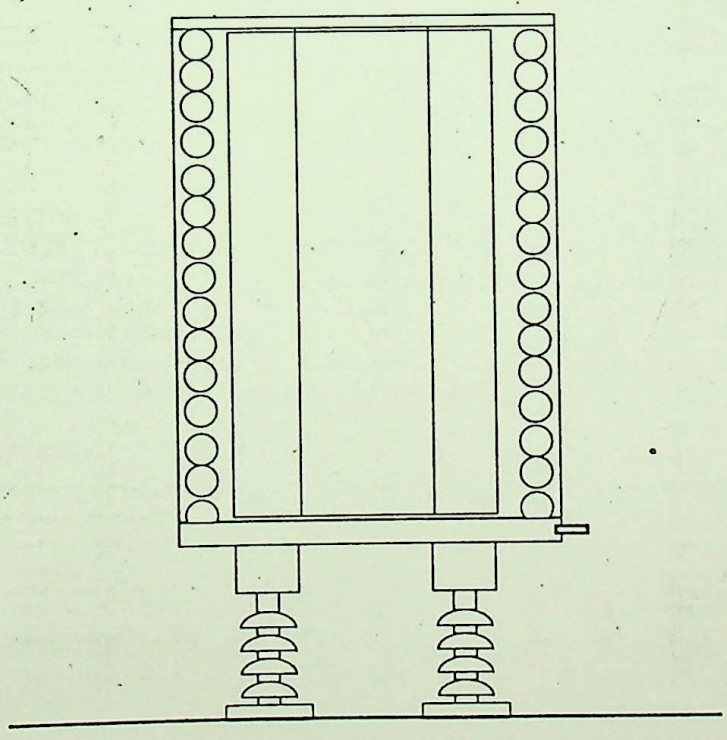


REATOR

ANEXO 29







REATOR

ANEXO 29

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 2, cap 1.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6       0.1          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      B1    B2            .00645 .0599
      B3                                548.                                  1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
      B2    B3      0.01        1.                        0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1      179.62       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 13, cap 1.
*
*   . . . . . . . . Time card
  .25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
     B1    B2                          1.                              1
     B1    B2                          1.                              1
     B1    B2                          1.                              1
     B2    B3                          1.                              1
     B2    B3                          1.                              1
     B2    B3                          1.                              1
     B3                                1.                              3
     B3                                1.                              3
     B3                                1.                              3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Time-controlled switch
     B1    B2      0.02        1.                    0.00001             1
     B2    B3      0.04        1.                    0.00001             1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14    B1      311.16       60.       -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200811
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 14, cap 1.
*
*  . . . . . . . . Time card
   25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
     B1    B2                          1.                              1
     B1    B2                          1.                              1
     B1    B2                          1.                              1
     B2    B3                          1.                              1
     B2    B3                          1.                              1
     B2    B3                          1.                              1
     B3                                1.                              3
     B3                                1.                              3
     B3                                1.                              3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Time-controlled switch
     B1    B2      0.02        1.                    0.00001             1
     B2    B3      0.04        1.                    0.00001             1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Voltage or current sources
14   B1      311.16      60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1     **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Biblioteca MAUÁ BIM

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 17, cap 1.
*
*
    . . . . . . . . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*
    . . . . . . . . Lumped RLC branch
      B1    B2                          1.                                  1
      CH    B2                          1.                                  1
      CH    B2                          1.                                  1
      B2    B3                          1.                                  1
      B2    B3                          1.                                  1
      B2    B3                          1.                                  1
      B3                                1.                                  1
      B3                                1.                                  1
      B3                                1.                                  1
       F    CH            1.E-9                                             1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Time-controlled switch
      CH    B1       -1.     0.035                    0.00001                1
      B1    B2     0.025     0.035                    0.00001                1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14     F      311.16       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1      **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 20, cap 1.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      B1    B2                          1.                                  1
      CH    B2                          1.                                  1
      CH    B2                          1.                                  1
      B2    B3                          1.                                  1
      B2    B3                          1.                                  1
      B2    B3                          1.                                  1
      B3                                1.                                  1
      B3                                1.                                  1
      B3                                1.                                  1
       F    CH              1.E-9                                           1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
      CH    B1       -1.     .0220                      0.00001              1
      B1    B2      .0209    .0220                      0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14     F      311.16       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1        **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 4, cap 2.
*
*   . . . . . . . . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
      B                       1.  10.                                    1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Time-controlled switch
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14     B      179.60       60.      -90.                              -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 4, cap 2.
*
*   . . . . . . . . . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   . . . . . . . . . Lumped RLC branch
      B                     1.   5.                                    1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . . Time-controlled switch
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . . Voltage or current sources
14     B      179.60       60.       -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1        **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 9, cap 2.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
     B1    B2            0.076  4.04                                        1
     B3                        101.
     B3                  31.74
     B3                              55.71
*
$ = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
*
     B2    B3       -1.       1.                        0.0001
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14   B1     11268.0       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . .  .Case identification card
arquivo de dados, figura 9, cap 2.
*
*   . . . . . .  . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   . . . . . .  . Lumped RLC branch
      B1    B2            0.076  4.04                                  1
      B3                        101.
      B3                  31.74
      B3                              13.9
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . .  . Time-controlled switch
*
      B2    B3       -1.       1.                        0.0001            1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . .  . Voltage or current sources
14    B1     11268.0       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
simulacao, figura 8, cap 3.
*
*   . . . . . . . . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
      B3                      3.                                          1
      B1    B2              1.E-9                                         1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Time-controlled switch
-1    B2    B3        0.                          0.      0.01        60.   1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14    B1     14.1421       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
simulacao, figura 8, cap 3.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
     B3                       3.                                          1
     B2                                 500.                              1
     B1    B2              1.E-9                                          1
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
-1    B2    B3        0.                          0.      0.01        60.   1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1     14.1421       60.      -90.                        -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 11, cap 3.
*
*  . . . . . . . . Time card
   10.E-6       0.1          1.E-201
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
     PP    PN              0.1   1.3
     LA    CA             .00430 .0148                                      1
     LB    CB             .00430 .0148                                      1
     LC    CC             .00430 .0148                                      1
*
*  . . . . . . . . . Three single-phase transformer units (simplified)
*  (saved into file M:\TRANS.TRT)
51   FA    FBINVERSE      0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52   LA    N              0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                          0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51   FB    FCINVERSE      0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52   LB    N              0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                          0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51   FC    FAINVERSE      0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52   LC    N              0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                          0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
$ = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Thyristors
-1   CA    PP                                  60.    0.0001        60.
-1   CB    PP                                 180.    0.0001        60.
-1   CC    PP       -1.                       300.    0.0001        60.
-1   PN    CC                                 120.    0.0001        60.
-1   PN    CB       -1.                       360.    0.0001        60.
-1   PN    CA                                 240.    0.0001        60.
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Voltage or current sources
14   PA     11267.6       60.      -90.                          -1.
14   PB     11267.6       60.      150.                          -1.
14   PC     11267.6       60.       30.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 12, cap 3.
*
*   . . . . . . . . Time card
    10.E-6       0.1          1.E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
      PP    PN              0.1   1.3
      LA    CA            .00430 .0148                                    1
      LB    CB            .00430 .0148                                    1
      LC    CC            .00430 .0148                                    1
*
*   . . . . . . . . . Three single-phase transformer units (simplified)
*   (saved into file M:\TRANS.TRT)
51    FA    FBINVERSE     0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52    LA     N            0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                          0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51    FB    FCINVERSE     0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52    LB     N            0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                          0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51    FC    FAINVERSE     0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52    LC     N            0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                          0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Thyristors
-1    CA    PP                                  60.    0.0001        60.
-1    CB    PP                                 180.    0.0001        60.
-1    CC    PP      -1.                        300.    0.0001        60.
-1    PN    CC                                 120.    0.0001        60.
-1    PN    CB    -1.                          360.    0.0001        60.
-1    PN    CA                                 240.    0.0001        60.
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14    FA     11267.6       60.      -90.                        -1.
14    FB     11830.3       60.      150.                        -1.
14    FC     10703.6       60.       30.                        -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 13, cap 3.
*
*  . . . . . . . . Time card
  '10.E-6      0.1          1.E-201
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
     PP    PN              0.1   1.3
     LA    CA            .00436 .0145                                      1
     LB    CB            .00450 .0150                                      1
     LC    CC            .00463 .0154                                      1
*
*  . . . . . . . . . Three single-phase transformer units (simplified)
*  (saved into file H:\TRANS.TRT)
51   FA    FBINVERSE     0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52   LA     N            0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                         0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51   FB    FCINVERSE     0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52   LB     N            0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                         0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51   FC    FAINVERSE     0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52   LC     N            0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                         0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Thyristors
-1   CA    PP                                  60.    0.0001        60.
-1   CB    PP                                 180.    0.0001        60.
-1   CC    PP       -1.                       300.    0.0001        60.
-1   PH    CC                                 120.    0.0001        60.
-1   PN    CB       -1.                       360.    0.0001        60.
-1   PN    CA                                 240.    0.0001        60.
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Voltage or current sources
14   FA     11267.6       60.      -90.                        -1.
14   FB     11267.6       60.      150.                        -1.
14   FC     11267.6       60.       30.                        -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 14, cap 3.
*
*   . . . . . . . . . Time card
    10.E-6        0.1           1.E-201
*
*   . . . . . . . . . Lumped RLC branch
      PP    PN              0.1   1.3
      LA    CA             .00430 .0148                                      1
      LB    CB             .00430 .0148                                      1
      LC    CC             .00430 .0148                                      1
*
*   . . . . . . . . . Three single-phase transformer units (simplified)
*   (saved into file H:\TRANS.TRT)
51    FA    FBINVERSE      0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52    LA     N             0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                           0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51    FB    FCINVERSE      0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52    LB     N             0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                           0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
51    FC    FAINVERSE      0.1713961714E+00 0.5498826423E-01
52    LC     N             0.0000000000E+00-0.2987551364E+01
                           0.5806445806E-04 0.1623157828E+03
$ = = End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . . Thyristors
-1    CA    PP                                  60.6    0.0001        60.
-1    CB    PP                                 181.8    0.0001        60.
-1    CC    PP       -1.                       333.     0.0001        60.
-1    PN    CC                                 121.2    0.0001        60.
-1    PN    CB       -1.                       363.6    0.0001        60.
-1    PN    CA                                 242.4    0.0001        60.
$ = = = End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . . Voltage or current sources
14    FA    11267.6       60.      -90.                        -1.
14    FB    11267.6       60.      150.                        -1.
14    FC    11267.6       60.       30.                        -1.
$ = = = End of level 3: Sources = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1        **** All voltages will be printed ****
$ = = = Level 5: End of data case = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 11, cap 4.
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Time card
  50.E-6      0.05          1.E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      FA    CA            1.E-9                                          3
      CA    N                          16.72                             3
      FB    N                          16.72                             3
      FC    N                          16.72                             3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
      CA    N       0.02        1.
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    FA     11267.6       60.       -90.                          -1.
14    FB     11267.6       60.       150.                          -1.
14    FC     11267.6       60.        30.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1        **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Biblioteca MAUÁ BIM
de Engenharia de Icajubá - EFEI

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 19, cap 4.
*
*
    . . . . . . . . Time card
    50.E-6      0.05          1.E-201
*
*
    . . . . . . . . Three single-phase transformer units (simplified)
*   (saved into file M:\TRANC4.TRT)
51    FA    FBINVERSE      0.2999459995E+01 0.2639412928E-02
52    LA     N             0.0000000000E+00-0.2285923083E-01
                           0.3998844595E-01 0.1979775232E+00
51    FB    FCINVERSE      0.2999459995E+01 0.2639412928E-02
52    LB     N             0.0000000000E+00-0.2285923083E-01
                           0.3998844595E-01 0.1979775232E+00
51    FC    FAINVERSE      0.2999459995E+01 0.2639412928E-02
52    LC     N             0.0000000000E+00-0.2285923083E-01
                           0.3998844595E-01 0.1979775232E+00
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
      LA                          16.72                              3
      LB                          16.72                              3
      LC                          16.72                              3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
      LA          0.02        1.
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14    FA     56338.2      60.      -90.                              -1.
14    FB     56338.2      60.      150.                              -1.
14    FC     56338.2      60.       30.                              -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 24, cap 4.
*
*  . . . . . . . . Time card
   50.E-6      0.08          0.5E-201
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
    CA1   BA1                          1.
    CA2   BA1                          1.
     FA   BA1                          1.
    BA1     N                          3.                                  3
     FB   BB1                          3.                                  3
    BB1     N                          3.
     FC   BC1                          3.
    BC1     N                          3.
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Time-controlled switch
     FA   CA1      -1.      0.02                    0.00001                  1
     FA   CA2      -1.      0.06                    0.00001                  1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Voltage or current sources
14   FA      311.16      60.      -90.                          -1.
14   FB      311.16      60.       30.                          -1.
14   FC      311.16      60.      150.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  . . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 4, cap 5.
*
*  . . . . . . . . . Time card
   25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*  . . . . . . . . . Lumped RLC branch
     FA     N                        8.35
     FA     N                        8.35
     FA     N                        8.35
     FA     B1          1.E-9                                          1
     B1     N                        8.35                            1
     FB     N                       33.42
     FC     N                       33.42
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . . Time-controlled switch
     B1     N   0.0166      1.                        0.00001
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . . Voltage or current sources
14    FA    11267.65      60.      -90.                          -1.
14    FB    11267.65      60.      150.                          -1.
14    FC    11267.65      60.       30.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 4, cap 5.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      FA    N                          8.35
      FA    B1           1.E-9                                          1
      B1    N                          8.35                            1
      FB    N                         16.71
      FC    N                         16.71
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
      B1    N   0.0166       1.                        0.00001
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    FA    11267.65      60.      -90.                          -1.
14    FB    11267.65      60.      150.                          -1.
14    FC    11267.65      60.       30.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados da figura 3, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
*                        transformador
      B1    B2              0.24  5.54
*                        cabos
      B2    B3             0.006 0.007
*                    banco de capacitores  energizado
      B3                              47.75
*                    banco de capacitores a ser energizado
      B4                              47.75                                  3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
*
      B3    B4     .0208        1.                        0.0001              1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1     11268.0       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 4, cap 6:
*
*  . . . . . . . . Time card
   25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
*                  transformador
     B1    B2              0.24  5.54
*                  cabos
     B2    B3              0.006 0.007
*                 banco de capacitores
     B4                              47.75                              3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Time-controlled switch
*
     B3    B4     .0208       1.                .      0.0001             1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Voltage or current sources
14   B1     11268.0      60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 5, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
*                         transformador
     B1    B2                0.24  5.54
*                         cabos
     B2    B3               0.006 0.007
*                      banco de capacitores
     B4                                47.75                                  3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
*
     B3    B4     .0208        1.                        0.0001                1
     B5    B4       -1.      0.01                        0.0001                1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14   B1     11268.0       60.      -90.                          -1.
14   B5     11268.0    0.0001        0.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 6, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
*                         transformador
     B1    B2                0.24  5.54
*                         cabos
     B2    B3               0.006 0.007
*                      banco de capacitores
     B4                                47.75                                  3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
*
     B3    B4     .0208        1.                        0.0001                1
     B5    B4       -1.       0.01                       0.0001                1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1     11268.0       60.      -90.                          -1.
14    B5    -11268.0    0.0001        0.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 9, cap 6.
*
*   . . . . . . . Time card
    5.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   . . . . . . . Lumped RLC branch
*                 transformador
     B1    B2                0.24  5.54
*                 cabos
     B2    B3                0.006 0.007
     B2    B4                0.006 0.007
*                banco de capacitores  energizado
     B3                                47.75                                  3
*                banco de capacitores a ser energizado
     B5                                47.75                                  3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . Time-controlled switch
*
     B4    B5     .0208        1.                          0.0001             1
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . Voltage or current sources
14   B1     11268.0       60.      -90.                              -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 10, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
*                        transformador
      B1    B2              0.24  5.54
*                        cabos
      B2    B3              0.006 0.007
*                     banco de capacitores
      B4                              47.75                                  3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
*
      B3    B4       -1.    0.0208                        0.0001              3
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1     11268.0       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EE
Biblioteca MAUÁ BIM

```
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 12, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Time card
   25.E-6      0.06          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
*                          transformador
     B1    B2                  0.24  5.54
*                          cabos
     B2    B3                  0.006 0.007
*                        banco de capacitores
     B4                                  47.75                                  3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
*
     B3    B4       -1.    0.0208                          0.0001                 3
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1     11268.0       60.      -90.                              -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 13, cap 6
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    20.E-6       0.1  1
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      F1    B2                    1.                                    3
      B2                  10.E+6
      B3                                60.                             3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
      B2    B3      0.02      0.03                      0.0001
      B2    B3     0.035     0.045                      0.0001
      B2    B3     0.050     0.060                      0.0001
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    F1    15000.       60.                                  -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 13, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Time card
   50.E-6      0.15
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
     B1    B2                  1.2                                    3
     B3                              60.                              3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
     B2    B3      0.02      0.04                      0.0001          2
                   0.05     0.066                                      2
                  0.075     0.092                                      2
                   0.10     0.116                                      2
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1      11267.       60.                                  -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 15, cap 6.
*
*   . . . . . . . . Time card
     5.E-6      0.05          0.5E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
*  ************************ COM RESISTOR LIMITADOR DE CORRENTE*****************
      B1    B2            .00048.00962
      B3                    0.56      1102.1                                  3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*    . . . . . . . . Time-controlled switch
      B2    B3    0.0208        1.                        0.00001             1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14    B1        311.       60.       -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 15, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
     5.E-6      0.05          0.5E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
*  ************************* SEM LIMITADORES DE CORRENTE **********************
      B1    B2            .00048.00962
      B3                            1102.1                                  3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
      B2    B3    0.0208        1.                      0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1        311.       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 15, cap 6.
*
*   . . . . . . . . Time card
    5.E-6      0.05          0.5E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
*  ************************ COM INDUTORES LIMITADORES DE CORRENTE ************
     B1    B2            .00048.00962
     B3                        0.0061102.1                                    3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*   . . . . . . . . Time-controlled switch
     B2    B3    0.0208       1.                        0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
14   B1        311.       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - BIBLIOTECA MAUÁ BIM

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 19, cap 6.
*
*   . . . . . . . . Time card
    50.E-6      0.05          1.E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
     B1    B2                    16.8                                    1
     L1                              14.64                               1
*
*
*
*   . . . . . . . . Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file H:\TRANS2.TRF)
51    H2       INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L2                    0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                            0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*   . . . . . . . . Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file H:\TRNAS2.TRF)
51    B2       INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L1                    0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                            0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*
*
     B2                          1.E20                                   1
*                           iiiiiiffffff
93    H2                     .009  284.                                  3
*
-3.973+3-7.5+3
  -7.110-356.0
  -3.137-349.0
  -1.455-346.0
  -1.200-341.0
  -0.862-336.3
  -0.572-329.0
  -0.402-321.0
  -0.298-313.0
  -0.168-299.0
  -0.090-284.0
  -0.083-269.0
     0.    0.
   0.083 269.0
   0.090 284.0
   0.168 299.0
   0.298 313.0
   0.402 321.0
   0.572 329.0
   0.862 336.0
   1.200 341.0
   1.455 346.0
   3.137 349.0
   7.110 356.0                                                           1
 3.973+3 7.5+3
9999999.
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
```

```
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
     B2    H2     .0180       1.                          0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1  118676.652       60.      -90.                          0.0166        1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 20, cap 6.
*
*   . . . . . . . . Time card
    50.E-6      0.05          1.E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
      B1    B2                  16.8                                    1
      L1                            14.64                               1
      L2                            14.64                               1
*
*
*
*   . . . . . . . . Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file H:\TRANS2.TRF)
51    H2      INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L2                   0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                           0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*   . . . . . . . . Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file H:\TRNAS2.TRF)
51    B2      INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L1                   0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                           0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*
*
      B2                        1.E20                                   1
*                          iiiiiiffffff
93    H2                    .168  299.                                  3
*
-3.973+3-7.5+3
  -7.110-356.0
  -3.137-349.0
  -1.455-346.0
  -1.200-341.0
  -0.862-336.3
  -0.572-329.0
  -0.402-321.0
  -0.298-313.0
   0.298 313.0
   0.402 321.0
   0.572 329.0
   0.862 336.0
   1.200 341.0
   1.455 346.0
   3.137 349.0
   7.110 356.0                                                          1
 3.973+3 7.5+3
9999999.
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Time-controlled switch
      B2    H2     .0207       1.                        0.00001          1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   . . . . . . . . Voltage or current sources
```

```
14    B1  123944.180       60.      -90.                          -1.       1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   . . . . . . . . Case identification card
arquivo de dados, figura 25, cap 6.
*
*   . . . . . . . . Time card
    50.E-6      0.05          1.E-201
*
*   . . . . . . . . Lumped RLC branch
     B1    B2                   16.8                                    1
     L1                              14.64                              1
     L2                              14.64                              1
*
*
*
*   . . . . . . . . Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file H:\TRANS2.TRF)
51    H2      INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L2                   0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                           0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*   . . . . . . . . Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file H:\TRNAS2.TRF)
51    B2      INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L1                   0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                           0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*
*
     B2                        1.E20                                    1
*                         iiiiiiffffff
93    H2                    .168  299.                                  3
*
-3.973+3-7.5+3
  -7.110-356.0
  -3.137-349.0
  -1.455-346.0
  -1.200-341.0
  -0.862-336.3
  -0.572-329.0
  -0.402-321.0
  -0.298-313.0
  -0.168-299.0
  -0.090-284.0
  -0.083-269.0
     0.    0.
   0.083 269.0
   0.090 284.0
   0.168 299.0
   0.298 313.0
   0.402 321.0
   0.572 329.0
   0.862 336.0
   1.200 341.0
   1.455 346.0
   3.137 349.0
   7.110 356.0                                                           1
 3.973+3 7.5+3
9999999.
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 27, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
    50.E-6      0.05          1.E-201
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      B1    B2                    16.8                                    1
      B1                                14.64                             1
      L2                                14.64                             1
*
*
*
*   .   .   .   .   .   .   .  Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file M:\TRANS2.TRF)
51    B2      INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L2                   0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                           0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*   .   .   .   .   .   .   .  Single-phase transformer (simplified)
*   (saved into file M:\TRNAS2.TRF)
51    B2      INVERSE      0.4337327748E+00 0.1473792826E-01
52    L1                   0.0000000000E+00-0.5897391988E-01
                           0.2708788683E-01 0.2359845403E+00
*
*
*
      B2                        1.E20                                     1
*                          iiiiiiffffff
93    B2                    .168  299.                                    3
*
-3.973+3-7.5+3
  -7.110-356.0
  -3.137-349.0
  -1.455-346.0
  -1.200-341.0
  -0.862-336.3
  -0.572-329.0
  -0.402-321.0
  -0.298-313.0
  -0.168-299.0
  -0.090-284.0
  -0.083-269.0
      0.    0.
   0.083 269.0
   0.090 284.0
   0.168 299.0
   0.298 313.0
   0.402 321.0
   0.572 329.0
   0.862 336.0
   1.200 341.0
   1.455 346.0
   3.137 349.0
   7.110 356.0                                                            1
 3.973+3 7.5+3
9999999.
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
     B2    H2     .0207       1.                        0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1  123944.418       60.      -90.                        0.0166       1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 33, cap 6.
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Time card
    50.e-6      0.05          1.e-201
*
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      B1    B2                  153.                                    3
      B2    B3                  153.                                    3
      B3    B1                  153.                                    3
      B1    B2                       26.2                               3
      B2    B3                       26.2                               3
      B3    B1                       26.2                               3
*
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
      FA    B1       -1.     0.02                    0.00001             1
      FB    B2       -1.     0.02                    0.00001
      FC    B3       -1.     0.02                    0.00001
*   .   .   .   .   .   .   .   . Thyristor and Diode switch
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    FA        179.      60.      -90.                        -1.
14    FB        179.      60.      150.                        -1.
14    FC        179.      60.       30.                        -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1    .   **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time-controlled switch
     L1   B1     .0257       1.                        0.00001              1
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14   B1  123944.180       60.      -90.                        0.0207       1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .  .  .  .  .  .  .  .  . Case identification card
arquivo de dados, figura 7, cap 7.
*
*   .  .  .  .  .  .  .  .  . Time card
*   .  .  .  .  .  .  .  .  .          FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                        60.     60.   1140.
*
*   .  .  .  .  .  .  .  .  . Lumped RLC branch
      I                        1.2 125.5                                  3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = =
*
*   .  .  .  .  .  .  .  .  . Voltage or current sources
14     I-1    1.4142       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 9, cap 7.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
*   .   .   .   .   .   .   .                FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                              60.     60.   1140.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      I                          1.2                                        3
      I                              125.5                                  3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources.
14     I-1    1.4142       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 20, cap 7.
*
*                    OBS: COM BANCO DE CAPACITORES
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
*   .   .   .   .   .   .   .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                             60.    -60.   1140.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
******************************* SISTEMA ********************************
      B                          1.29                                    3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14     B-1     16.40     180.     -90.                          -1.
14     B-1      8.20     240.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80     300.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40     420.     -90.                          -1.
14     B-1     14.76     540.     -90.                          -1.
14     B-1     180.4     660.     -90.                          -1.
14     B-1      6.56     720.     -90.                          -1.
14     B-1     114.8     780.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40    1020.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80    1140.     -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1      **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 20, cap 7.
*
*                    OBS: COM BANCO DE CAPACITORES
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
*   .   .   .   .   .   .   .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                             60.    -60.   1140.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
******************************* SISTEMA ********************************
      B                          1.29
************************** BANCO DE CAPACITORES ***********************
      B                                83.57                                3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14     B-1     16.40      180.      -90.                          -1.
14     B-1      8.20      240.      -90.                          -1.
14     B-1     32.80      300.      -90.                          -1.
14     B-1     16.40      420.      -90.                          -1.
14     B-1     14.76      540.      -90.                          -1.
14     B-1     180.4      660.      -90.                          -1.
14     B-1      6.56      720.      -90.                          -1.
14     B-1     114.8      780.      -90.                          -1.
14     B-1     16.40     1020.      -90.                          -1.
14     B-1     32.80     1140.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 23, cap 7.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
*   .   .   .   .   .   .   .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
    50.E-6      0.03
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
      B1    B2                  78.176
      B2                                10.                                3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14    B1+1    1.4142       60.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Escola Geral de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 26, cap 7.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
*   .   .   .   .   .   .   .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                             60.    -60.   1140.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
******************************* SISTEMA ********************************
      B                          1.29                                      3
*************************************************************************
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14     B-1     16.40     180.      -90.                          -1.
14     B-1      8.20     240.      -90.                          -1.
14     B-1     32.80     300.      -90.                          -1.
14     B-1     16.40     420.      -90.                          -1.
14     B-1     14.76     540.      -90.                          -1.
14     B-1     180.4     660.      -90.                          -1.
14     B-1      6.56     720.      -90.                          -1.
14     B-1     114.8     780.      -90.                          -1.
14     B-1     16.40    1020.      -90.                          -1.
14     B-1     32.80    1140.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  .  .  .  .  .  .  .  . Case identification card
arquivo de dados, figura 27, cap 7.
*
*  .  .  .  .  .  .  .  . Time card
*  .  .  .  .  .  .  .  .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                         60.    -60.   1140.
*
*  .  .  .  .  .  .  .  . Lumped RLC branch
******************************* SISTEMA *********************************
      B                        1.29                                      3
*************************************************************************
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  .  .  .  .  .  .  .  . Voltage or current sources
14     B-1     16.40     180.     -90.                          -1.
14     B-1      8.20     240.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80     300.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40     420.     -90.                          -1.
14     B-1     14.76     540.     -90.                          -1.
14     B-1     180.4     660.     -90.                          -1.
14     B-1      6.56     720.     -90.                          -1.
14     B-1     114.8     780.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40    1020.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80    1140.     -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  .  .  .  .  .  .  . Case identification card
arquivo de dados, figura 27, cap 7.
*
*  .  .  .  .  .  .  . Time card
*  .  .  .  .  .  .  .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                      60.    -60.   1140.
*
*  .  .  .  .  .  .  . Lumped RLC branch
******************************* SISTEMA *********************************
      B                        1.29                                      2
*************************************************************************
      B                              83.57                               1
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  .  .  .  .  .  .  . Voltage or current sources
14     B-1     16.40     180.     -90.                          -1.
14     B-1      8.20     240.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80     300.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40     420.     -90.                          -1.
14     B-1     14.76     540.     -90.                          -1.
14     B-1     180.4     660.     -90.                          -1.
14     B-1      6.56     720.     -90.                          -1.
14     B-1     114.8     780.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40    1020.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80    1140.     -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  .  .  .  .  .  .  . Case identification card
arquivo de dados, figura 27, cap 7.
*
*  .  .  .  .  .  .  . Time card
*  .  .  .  .  .  .  .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                      60.    -60.   1140.
*
*  .  .  .  .  .  .  . Lumped RLC branch
****************************** SISTEMA ********************************
      B                        1.29                                      2
*************************************************************************
      B                        5.54 75.54                                1
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  .  .  .  .  .  .  . Voltage or current sources
14     B-1     16.40     180.     -90.                          -1.
14     B-1      8.20     240.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80     300.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40     420.     -90.                          -1.
14     B-1     14.76     540.     -90.                          -1.
14     B-1     180.4     660.     -90.                          -1.
14     B-1      6.56     720.     -90.                          -1.
14     B-1     114.8     780.     -90.                          -1.
14     B-1     16.40    1020.     -90.                          -1.
14     B-1     32.80    1140.     -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*  .  .  .  .  .  .  . Case identification card
arquivo de dados, figura 33, cap 7.
*
*  .  .  .  .  .  .  . Time card
*  .  .  .  .  .  .  .              FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                      60.    -60.   1140.
*
*  .  .  .  .  .  .  . Lumped RLC branch
****************************** SISTEMA ********************************
      B                        1.29                                    3
************************** FILTRO BASICO   7 **************************
      B                        18.1   8.15
************************** FILTRO BASICO  11 **************************
      B                        0.72  82.45
************************** FILTRO BASICO  13 **************************
      B                        3.26  13.06
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  .  .  .  .  .  .  . Voltage or current sources
14    B-1    16.40     180.     -90.                        -1.
14    B-1     8.20     240.     -90.                        -1.
14    B-1    32.80     300.     -90.                        -1.
14    B-1    16.40     420.     -90.                        -1.
14    B-1    14.76     540.     -90.                        -1.
14    B-1    180.4     660.     -90.                        -1.
14    B-1     6.56     720.     -90.                        -1.
14    B-1    114.8     780.     -90.                        -1.
14    B-1    16.40    1020.     -90.                        -1.
14    B-1    32.80    1140.     -90.                        -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

```
*
*   .   .   .   .   .   .   . Case identification card
arquivo de dados, figura 33, cap 7.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Time card
*   .   .   .   .   .   .   .                FMIN!  DELTF!   FMAX!
                                              60.    -60.   1140.
*
*   .   .   .   .   .   .   . Lumped RLC branch
******************************* SISTEMA ********************************
      B                          1.29                                    3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
*
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*   .   .   .   .   .   .   . Voltage or current sources
14     B-1     16.40      180.      -90.                          -1.
14     B-1      8.20      240.      -90.                          -1.
14     B-1     32.80      300.      -90.                          -1.
14     B-1     16.40      420.      -90.                          -1.
14     B-1     14.76      540.      -90.                          -1.
14     B-1     180.4      660.      -90.                          -1.
14     B-1      6.56      720.      -90.                          -1.
14     B-1     114.8      780.      -90.                          -1.
14     B-1     16.40     1020.      -90.                          -1.
14     B-1     32.80     1140.      -90.                          -1.
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1       **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

Z_{2n} - Impedância equivalente "vista da barra 2" para um harmônico de ordem n;
Z_L - Impedância do surto;
Z_N - Impedância natural do circuito;
Z_{PR} - Impedância do pára-raios.

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA .

02/07/03		
17.07.03		
01/08/03		
22/08/03		
23 5 [illegible]		

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200811
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA