

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



**APLICAÇÕES DE COMPENSADORES
ESTÁTICOS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS**

HERMES ROBERTO P. M. DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO ROBERTO COGO

Itajubá/MG

- 1994 -



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

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 359 de 03.11.94, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Aplicações de Compensadores Estáticos em Sistemas Elétricos" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Sistemas Elétricos de Potência, satisfeitas as demais exigências regimentais, a Hermes Roberto P. M. de Oliveira.

Itajubá, 04 de novembro de 1994.

Profa. Francisca Aparecida de Camargo Pires
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Angelo José Junqueira Rezek
2º Examinador - EFEI

Prof. João Roberto Cogo
3º Examinador - EFEI - Orientador



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

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação "Aplicações de Compensadores Estáticos em Sistemas Elétricos"

Autor: HERMES ROBERTO P. M. DE OLIVEIRA

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
2º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
3º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
4º	XXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXX

Resultado Médio: Conceito A⁺, ou seja, Aprovado com distinção

Observações: _____

Itajubá, 04 de novembro de 1994.

[assinatura]

Profa. Francisca Aparecida de Camargo Pires
 1º Examinador - UNICAMP

[assinatura]

Prof. Angelo José Junqueira Rezek
 2º Examinador - EFEI

Prof. João Roberto Cogo
 3º Examinador - EFEI - Orientador

AGRADECIMENTOS

À minha esposa **Lena** pelo carinho, dedicação e apoio nos momentos mais difíceis e desalentadores.

Aos meus pais, **Mário Hermes** e **Aracy**, por mostrarem-me desde cedo os maravilhosos caminhos do estudo.

Aos meus avós, **Mário Mascarenhas** e **Alexina** (In Memoriam), pelo amor e incentivo constante na Engenharia Elétrica.

Às minhas irmãs **Katia**, **Paloma** e **Juliana**, por todos os anos de companheirismo.

Ao Prof. **João Roberto Cogo**, que além de profissional brilhante, demonstrou ser um grande amigo e orientador atento e dedicado.

A todos os amigos e funcionários da Escola Federal de Engenharia de Itajubá que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta dissertação se tornasse realidade.

À **Deus**, o maior de todos os engenheiros.

ÍNDICE

Resumo	vi
"Abstract"	viii
Nomenclatura	x
CAPÍTULO 1 - AS NECESSIDADES DE REATIVOS DAS CARGAS ELÉTRICAS NÃO-LINEARES E SISTEMAS HVDC	01
1.1 - Introdução	01
1.2 - O fator de potência para formas de onda não-senoidais ..	02
1.2.1 - Definições básicas	02
1.2.2 - Análise simplificada do fator de potência envolvendo ondas distorcidas	05
1.3 - Fator de potência e harmônicos em acionamentos controlados e Sistemas HVDC	10
1.3.1 - Fator de potência de sistemas tiristorizados ...	13
1.3.2 - Harmônicos de corrente em pontes conversoras ...	15
1.3.2.1 - Harmônicos característicos	15
1.3.2.2 - Harmônicos não-característicos	17
1.3.3 - Medições em sistemas industriais contendo pontes conversoras	18
1.4 - Fornos elétricos a arco	21
1.4.1 - Variações da tensão originadas pelos fornos a arco	21
1.4.2 - Consumo de potência reativa	24
1.4.3 - Geração de harmônicos	25
1.5 - Conclusões acerca da presença de cargas não-lineares no sistema elétrico	29
CAPÍTULO 2 - SISTEMAS ESTÁTICOS "SHUNT" DE POTÊNCIA REATIVA ..	30
2.1 - Introdução	30
2.2 - Princípios da compensação de cargas através de impedâncias variáveis	31

2.2.1 - Compensação da carga através de admitâncias reativas	32
2.2.2 - Equacionamento da compensação em termos de componentes simétricos da corrente de carga	43
2.3 - Principais compensadores estáticos shunt utilizados na correção de grandes cargas industriais	52
2.3.1 - Capacitores chaveados a tiristores (CCT)	52
2.3.1.1 - Princípios de operação	53
2.3.1.2 - Tempo de resposta do CCT e características gerais	56
2.3.2 - Compensador estático tipo VAR adaptativo	58
2.3.2.1 - Características básicas	58
2.3.2.2 - Princípios básicos de operação	62
2.3.2.3 - Dimensionamento do AVC	63
2.3.2.4 - Processo de compensação efetuado pelo AVC	65
2.4 - Reator controlado a tiristores com capacitores fixos ...	68
2.4.1 - Princípios básicos de operação	69
2.4.2 - Forma prática de conexão e geração de harmônicos	72
2.5 - Equações práticas para controle de compensadores estáticos shunt	74
2.6 - Sistemas de controle de compensadores estáticos Shunt ..	79
2.6.1 - Controle de capacitores chaveados a tiristores .	80
2.6.2 - Controle de reatores controlados a tiristores com capacitores fixos	83
2.7 - Conclusões	90
 CAPÍTULO 3 - COMPENSAÇÃO SÉRIE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	 92
3.1 - Introdução	92
3.2 - Teoria básica da compensação série	93
3.2.1 - Melhoria no perfil das tensões ao longo da linha	95
3.2.2 - Redução das flutuações de tensão	97
3.2.3 - Elevação do fator de potência do alimentador ...	98
3.2.4 - Redução das perdas na transmissão de energia elétrica	99

3.2.5 - Suporte para partida de grandes motores	100
3.3 - Fatores a serem considerados no dimensionamento dos capacitores	100
3.4 - Possíveis problemas na aplicação de capacitores série ..	100
3.4.1 - Ferrorressonância	101
3.4.1.1 - Considerações gerais	101
3.4.2 - Instabilidade de máquinas síncronas	106
3.4.3 - Auto-excitação de motores de indução	107
3.4.4 - Aspectos de ordem prática que devem ser considerados na utilização de capacitores série	108
3.5 - Projeto e desempenho dos modernos compensadores série ..	109
3.6 - Conclusões	112
CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS NO PROGRAMA DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UBC-EFEI	114
4.1 - Introdução	114
4.2 - O programa UBC-EFEI	114
4.2.1 - Supressão das oscilações numéricas	116
4.2.2 - A subrotina Alpha	119
4.3 - Simulações de RCT/capacitores fixos compensando carga desequilibrada	121
4.3.1 - Modelagem do circuito de potência	121
4.3.2 - Obtenção das condições iniciais	125
4.3.3 - Sistema de controle implementado	127
4.3.4 - Casos simulados	131
4.3.5 - Resultados das simulações	135
4.4 - Simulação de compensador estático série	152
4.4.1 - Modelagem do sistema elétrico de potência e compensador série	152
4.4.2 - Casos simulados e resultados obtidos	154
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .	165
5.1 - Compensador estático paralelo ("shunt")	165
5.2 - Compensador série	166

Referências Bibliográficas 167

Apêndice A 170

Apêndice B 175

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo, apresentar os principais tipos de compensadores estáticos existentes, bem como enfocar as necessidades de reativos e a geração de harmônicos devido aos diversos tipos de cargas elétricas não-lineares (neste trabalho denominadas de Cargas Elétricas Especiais) existentes nos sistemas elétricos. Além disso, serão realizadas modelagens para representar tais compensadores em Programa de Transitórios Eletromagnéticos.

Em uma primeira etapa, abordam-se a ocorrência dos altos níveis de harmônicos de corrente e desbalanço de potência reativa em sistemas de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua ("HVDC") e grandes consumidores industriais, que possuem as citadas cargas elétricas especiais, bem como as formas de compensação de reativos das mesmas. Complementa-se esse quadro com uma análise dos equipamentos de correção e os seus sistemas de controle.

Em seguida, enfoca-se a modelagem dos compensadores estáticos em programas para cálculo de transitórios eletromagnéticos. A ferramenta aplicada, para tanto, é o Programa "UBC-EFEI" (University of British Columbia - Escola Federal de Engenharia de Itajubá), em que foram suprimidas as oscilações numéricas decorrentes de chaveamento na rede elétrica. Utilizando-se este programa determina-se o desempenho do compensador estático do tipo "Reator Controlado a Tiristores com capacitores fixos" (RCT/CF), e do compensador série. Os sistemas de controle de tais equipamentos são representados através de rotina desenvolvida neste trabalho, a qual foi referida no programa. Nessa fase realiza-se ainda simulações de sistemas de controle destinado a compensadores que corrigem carregamentos desequilibrados e variáveis.

Para avaliar o modelo desenvolvido apresenta-se os resultados obtidos junto a dois sistemas que possuem RCT/CF e compensador série. Em cada caso, através de representação simplificada do sistema de potência, mostra-se a eficiência desses

equipamentos. Tanto em situações de regime permanente, com as oscilações normais da carga, quanto para a ocorrência de variações bruscas na mesma. Constatou-se, dessa maneira, a eficiência do desempenho de tais compensadores frente as diversas solicitações de carregamentos que podem ocorrer em sistemas elétricos.

ABSTRACT

The present work of Dissertation purposes to present the main kinds of static compensators available, as well as to highlight the need of reactives and the generation of harmonics due to the several kinds of non-linear electrical loads (in this work termed Special Electrical Loads), available to represent such compensators in Electromagnetic Transient Program.

In a first step, the occurrence of high levels of current harmonics and the unbalance of reactive power in HVDC (High Voltage Direct Current Power Transmission Systems) and big industrial consumers, that present the mentioned special electrical loads, as well as their reactive compensation forms. This picture is complemented by an analysis of the correction equipment and their control systems.

Following, the modelling of static compensators in programs for calculation of electromagnetic transients is highlighted. The tool applied is the "UBC-EFEI" program (University of British Columbia - Escola Federal de Engenharia de Itajub), in which the numerical oscillations because of switching in the power network have been suppressed. By using this program the performance of the static compensator kind "Thyristor-Controlled Reactor with Fixed Capacitors" (RCT/CF) and of the series compensator is determined. The control systems of such equipment are represented through a routine developed in this work, which has been referred to in the program. In this step simulations of control systems fitting compensators used in the correction of unbalanced and varying loads are carried out as well.

So as to evaluate the model developed the results obtained with two systems with RCT/CF and series compensator are presented. In each case, the efficiency of such equipment is shown through simplified representation of the power system both in steady state situations, with the normal oscillations of the load and for the occurrence of sharp variations in it. So, the performance efficiency of such

compensators in face of several charge stresses that may take place in power systems is verified.

NOMENCLATURA

PAC	- ponto de acoplamento comum entre o sistema de suprimento de energia e consumidores
FP	- fator de potência
P	- potência ativa da carga
Q	- potência reativa da carga
S	- potência aparente da carga
U	- valor eficaz da tensão
I_1	- valor eficaz do componente fundamental da corrente
I_n	- valor eficaz do componente correspondente ao n-ésimo harmônico de corrente
ϕ	- ângulo de deslocamento da componente fundamental da corrente em relação a componente fundamental da tensão
ϕ_n	- ângulo de deslocamento do n-ésimo harmônico de corrente em relação a componente fundamental da tensão
P_n	- potência média relativa ao n-ésimo componente harmônico
I_{rms}	- valor eficaz total da corrente
U_{rms}	- valor eficaz total da tensão
F_{di}	- fator de distorção da corrente
U_{max}	- valor máximo da tensão
MS	- máquina síncrona
MIT	- motor de indução trifásico
P_{CA}	- potência média em corrente alternada
P_{DC}	- potência em corrente contínua
U_d	- tensão retificada (produzida por fonte controlada)
I_d	- corrente retificada
U_{do}	- tensão retificada (produzida por ponte não controlada)
Q_{max}	- potência reativa máxima absorvida pela carga

X_{sist}	- reatância indutiva do sistema elétrico de potência
R_{sist}	- resistência do sistema elétrico de potência
Z_{sist}	- impedância do sistema elétrico de potência
X_{tf}	- reatância indutiva do transformador do forno
S_{PAC}	- potência de curto-circuito no ponto de acoplamento comum
V_o	- tensão "atrás" da impedância do sistema
Y_{ab}	- admitância de carga conectada entre as fases A e B
G_{ab}	- condutância de carga conectada entre as fases A e B
B_{ab}	- susceptância de carga conectada entre as fases A e B
$B_{\text{bc}}^{(\text{ab})}$	- susceptância a ser inserida entre as fases B e C, para compensar carga entre as fases A e B
$B_{\text{ca}}^{(\text{ab})}$	- susceptância a ser inserida entre as fases C e A, para compensar carga entre as fases A e B
$I_{\text{R, ab}}$	- corrente fluindo para a carga conectada entre as fases A e B
$I_{\text{L, ca}}$	- corrente indutiva adicional necessária entre as fases C e A, para compensar o fator de potência e equilibrar as correntes trifásicas
$B_{\text{ab}}^{(\text{c})}, B_{\text{bc}}^{(\text{c})}, B_{\text{ca}}^{(\text{c})}$	- susceptâncias necessárias para conexão entre as fases indicadas para compensar e equilibrar carregamento desbalanceado e reativo
$I_{\text{a}}^{(\text{c})}, I_{\text{b}}^{(\text{c})}, I_{\text{c}}^{(\text{c})}$	- correntes compensadoras de fase que compensam e equilibram carregamento desbalanceado e reativo
a	- operador complexo
$I_{\text{a0}}, I_{\text{a1}}, I_{\text{a2}}$	- fasores das correntes de carga de sequência zero, positiva, e negativa, respectivamente

- $\text{Im}I_{a1}, \text{Im}I_{a2}$ - componente reativo da corrente de carga de sequência positiva e negativa, respectivamente
- $\text{Re}I_{a1}, \text{Re}I_{a2}$ - componente ativo da corrente de carga de sequência positiva e negativa, respectivamente
- $B_{N,ab}^{(c)}, B_{N,bc}^{(c)}, B_{N,ca}^{(c)}$ - susceptâncias de sequência negativa para conexão entre as fases para compensar e balancear carregamento desequilibrado e indutivo
- $B_{P,ab}^{(c)}, B_{P,bc}^{(c)}, B_{P,ca}^{(c)}$ - susceptâncias de sequência positiva para conexão entre as fases usadas na compensação e balanceamento de carga
- $I_{a2}^{(c)}, I_{b2}^{(c)}, I_{c2}^{(c)}$ - correntes de sequência negativa, das fases para compensação de carga desbalanceada e indutiva
- Q_{uc} - potência reativa de cada unidade capacitiva utilizada no compensador estático tipo CCT
- S_{cc} - potência de curto-circuito do sistema elétrico de potência
- $I_{LF}(\alpha)$ - valor eficaz da componente fundamental da corrente no indutor do RCT
- $I(\alpha)$ - corrente eficaz total absorvida pelo conjunto RCT/Capacitores fixos
- $I_F(\alpha)$ - componente fundamental da corrente $I(\alpha)$
- U_{ij}^* - conjugado da tensão entre as fases "i" e "j"
- $\text{Re} \left[\frac{U_{ij}^*}{\sqrt{3} U} \right] I_1$ - componente ativa da corrente na fase "i", e que está em fase com a tensão U_{ij}
- $\frac{U_{ij}^*}{\sqrt{3} U}$ - fasor unitário
- U_i^* - conjugado do fasor da tensão na fase "i"
- $I_{k,ij}$ - valor instantâneo positivo da corrente na fase K, quando a derivada da tensão entre as fases "i" e "j" é nula

$S_C, P_C, Q_C, \cos\phi_C$	- potências aparente, ativa, reativa e fator de potência após a compensação série
$S'_C, P'_C, Q'_C, \cos\phi'_C$	- potências aparente, ativa, reativa e fator de potência antes da compensação série
ΔP_{perdas}	- redução das perdas no alimentador de distribuição após a introdução de capacitores série
FP_{final}	- fator de potência final obtido nas simulações do RCT/Capacitores fixos
T_{comp}	- tempo utilizado para efetuar a compensação da carga pelo RCT/Capacitores fixos
$I_{\text{simétrica}}$	- corrente de simetrização resultante da atuação do RCT/Capacitores fixos
C.E.	- compensador estático

CAPÍTULO 1

AS NECESSIDADES DE REATIVOS DAS CARGAS ELÉTRICAS NÃO-LINEARES E SISTEMAS HVDC

1.1. INTRODUÇÃO

O rápido avanço na tecnologia dos semicondutores de potência tem contribuído, em escala cada vez mais frequente, para a melhoria do desempenho do setor elétrico. À medida que as pesquisas em torno desses dispositivos de estado sólido se desenvolvem, causando a queda dos seus preços no mercado, novas alternativas de uso desses equipamentos se apresentam, tanto para sistemas elétricos de potência, quanto para sistemas industriais. O crescimento dos níveis de tensão e corrente aplicados nesses dispositivos, ampliam ainda mais as possibilidades de futuras utilizações.

Apesar das inúmeras vantagens associadas ao uso desses dispositivos de chaveamento controlado, um dos seus principais efeitos negativos, consiste na injeção de harmônicos de corrente no sistema de suprimento de energia. Isso acarreta distorções nas formas de onda da tensão, bem como uma redução do fator de potência das instalações industriais que o utilizam.

Entre as diversas cargas elétricas especiais existentes, os fornos elétricos a arco, são os tradicionais causadores de problemas junto ao "Ponto de Acoplamento Comum" (PAC) entre consumidores e rede de suprimento AC, os quais, injetam toda ordem de harmônicos no sistema, que somados aos desequilíbrios que ocorrem durante a operação de fusão, levam a instalação industrial que se utiliza desse processo siderúrgico a baixíssimos fatores de potência e desagradáveis flutuações na tensão.

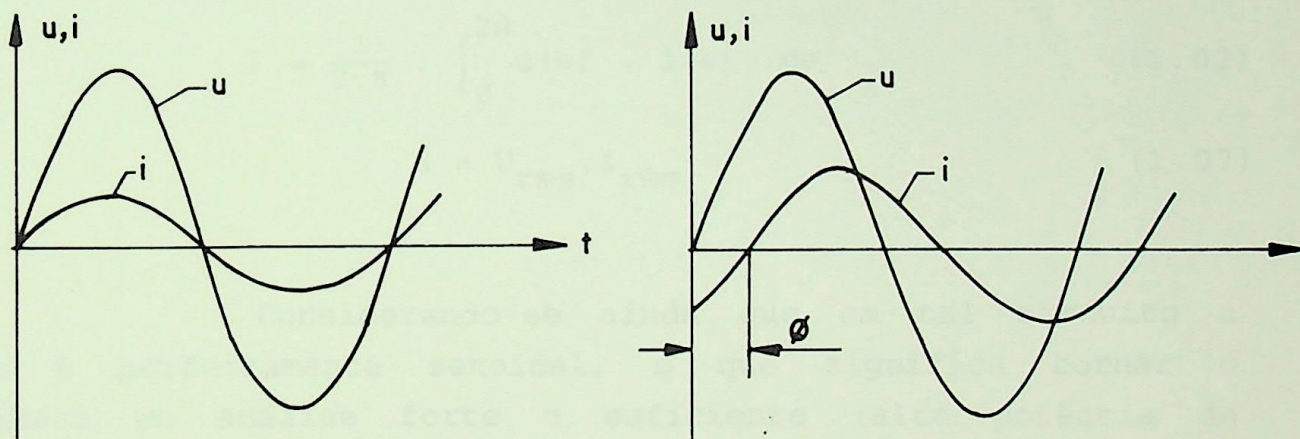
Analisa-se neste capítulo os critérios envolvidos na análise dos problemas vinculados aos harmônicos, com destaque para a energia reativa. Assim, são levantados alguns

procedimentos que devem ser observados no cálculo do fator de potência relativos as cargas elétricas especiais.

1.2. O FATOR DE POTÊNCIA PARA FORMAS DE ONDA NÃO-SENOIDAIS

1.2.1. DEFINIÇÕES BÁSICAS

Considere as formas de onda apresentadas na figura 1.1.



(a) Circuito puramente resistivo

(b) Circuito RL

Figura 1.1 - Formas de onda da tensão e corrente para análise do fator de potência

Observa-se, na figura anterior, as formas de onda da tensão e corrente, em uma mesma frequência (sem distorções). O ângulo ϕ indicado em (b) é denominado de "ângulo de deslocamento". Em (a), este ângulo de deslocamento é nulo, visto que a corrente está em fase com a tensão. Se, por outro lado, existirem distorções nas formas de onda, o ângulo de deslocamento não poderá ser definido diretamente, pois necessita ser efetuada a decomposição dos sinais nas suas diversas frequências.

O fator de potência, por sua vez, no caso dos sinais de tensões e correntes perfeitamente senoidais, coincide em valores numéricos com o cosseno do citado ângulo de deslocamento e para as ondas distorcidas, em que se observa a presença de harmônicos, isto, naturalmente, não ocorre.

Em um circuito monofásico, o fator de potência é, por definição, a relação entre a potência média (ou ativa, ou real, ou útil) consumida na instalação e a sua potência aparente. Ou seja,

$$FP = \frac{\text{POTÊNCIA MÉDIA}}{\text{POTÊNCIA APARENTE}} = \frac{P}{S} \quad (1.01)$$

onde,

$$P = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(\theta) \cdot i(\theta) \cdot d\theta \quad (1.02)$$

$$S = U_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (1.03)$$

Considerando-se ainda que em tal circuito a tensão é perfeitamente senoidal, o que significa tornar o barramento em análise forte o suficiente (alta potência de curto-circuito) para que as distorções causadas pela onda da corrente, suposta ser distorcida, não altere a forma de onda da tensão. Tem-se:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_{\text{max}} \cdot \text{sen } \omega t \quad (1.04)$$

e,

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \text{sen}(n\omega t + \theta_n) \quad (1.05)$$

onde:

U_1 - valor eficaz da tensão fase-neutro (ou valor eficaz do componente fundamental da tensão)

I_0 - valor médio do sinal de corrente;

I_1 - valor eficaz do componente fundamental da corrente;

ϕ - ângulo de deslocamento do componente fundamental;

I_n - valor eficaz do n-ésimo harmônico de corrente e,

ϕ_n - ângulo de deslocamento do n-ésimo harmônico de corrente em relação ao componente fundamental da tensão.

A partir das equações (1.01) a (1.05), pode-se escrever que o valor da potência média relativa a cada um dos componentes harmônicos, é dada por:

$$P_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} \left[\sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen} \omega t \right] \cdot \left[\sqrt{2} \cdot I_n \cdot \text{sen}(n\omega t + \phi_n) \right] \cdot d(\omega t) \quad (1.06)$$

Após serem feitas as expansões trigonométricas no segundo membro, resulta:

$$P_n = \frac{U \cdot I_n}{\pi} \int_0^{2\pi} \left[\text{sen}(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot \text{sen} \phi_n + \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(n\omega t) \cdot \cos \phi_n \right] d(\omega t) \quad (1.07)$$

É importante observar, na equação anterior que, para $n > 1$, a potência média, P_n é sempre nula, mostrando que os harmônicos não interferem no valor da potência ativa. Assim neste caso, tem-se:

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 \quad (1.08)$$

A potência aparente, apresentada em (1.03), depende dos valores eficazes das ondas de tensão e corrente.

$$S = U_1 \cdot \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (I_n)^2} \quad (1.09)$$

Logo de acordo com a definição do fator de potência, tem-se:

$$FP = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1}{U_1 \cdot \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \cdot \cos\phi_1 \quad (1.10)$$

Como o fator de distorção da corrente (F_{di}) é dado por:

$$F_{di} = \frac{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.11)$$

O fator de potência, conseqüentemente, pode ser reescrito como:

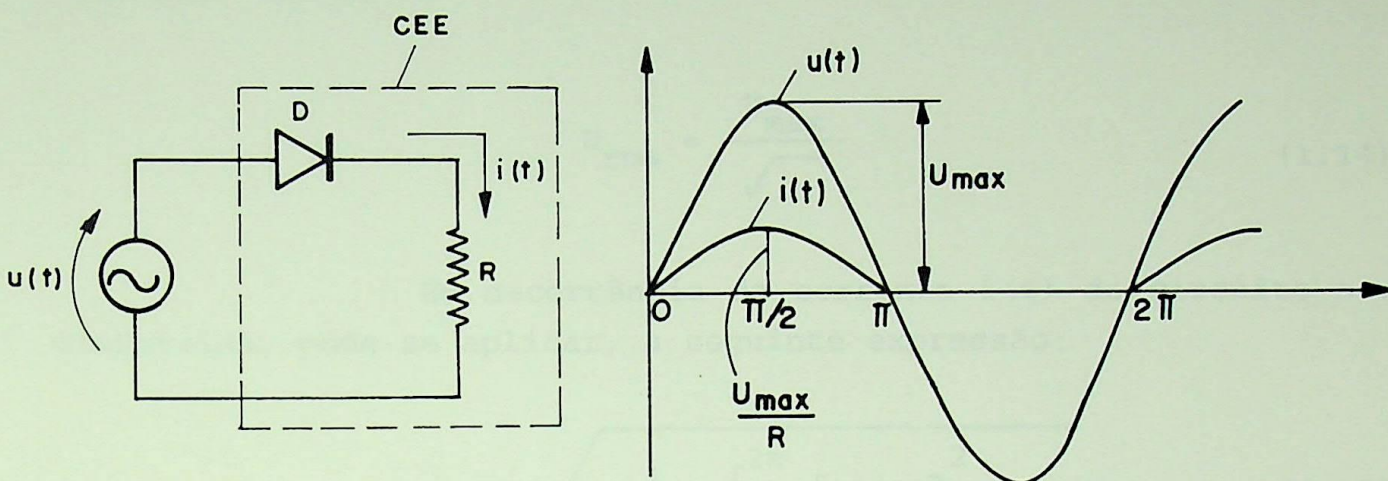
$$FP = \frac{\cos\phi_1}{F_{di}} \quad (1.12)$$

Conforme comentado inicialmente, deve-se salientar que a rede analisada possui nível de curto-circuito forte o suficiente para não conter distorções na forma de onda da tensão de alimentação. No entanto, em redes "mais fracas", o cálculo do fator de potência deve levar em consideração também a distorção da tensão. Como não é objetivo desse trabalho desenvolver equações precisas para tal cálculo, recomenda-se para uma compreensão mais aprofundada sobre o assunto, as referências [1] e [2].

1.2.2. ANÁLISE SIMPLIFICADA DO FATOR DE POTÊNCIA ENVOLVENDO ONDAS DISTORCIDAS

CASO 1.1

Apesar do seu caráter teórico, esse caso pretende mostrar o "problema" da energia reativa envolvendo um sistema elétrico contendo uma carga elétrica especial bastante simples como mostra a figura 1.2.



(a) Circuito teórico

(b) Formas de onda da tensão e corrente

Figura 1.2 - Circuito estudado e formas de onda da tensão e corrente

Na figura anterior tem-se:

D - Diodo

CEE - Carga Elétrica Especial

R - Resistência Elétrica

A potência ativa dissipada em R, pode ser calculada da seguinte forma:

$$P = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\pi} \left[U_{\max} \cdot \text{sen}\theta \right] \cdot \left[\frac{U_{\max}}{R} \cdot \text{sen}\theta \right] \cdot d\theta$$

Resultando:

$$P = \frac{U_{\max}^2}{4R} \quad (1.13)$$

A potência aparente, como comentado anteriormente, é dada por:

$$S = U_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}}$$

Como a tensão da figura 1.2 é perfeitamente senoidal, tem-se:

$$U_{\text{rms}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad (1.14)$$

Em decorrência da corrente $i(t)$ do circuito ser distorcida, pode-se aplicar, a seguinte expressão:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} [i(\theta)]^2 \cdot d\theta} \quad (1.15)$$

resultando:

$$I_{\text{rms}} = \frac{U_{\text{max}}}{2 \cdot R} \quad (1.16)$$

Assim, o fator de potência será dado por:

$$FP = \frac{\frac{U_{\text{max}}^2}{4R}}{\frac{U_{\text{max}} \cdot U_{\text{max}}}{\sqrt{2} \cdot 2R}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$$

Como pode ser observado, apesar de ser um circuito onde o consumo de energia elétrica ocorre apenas em um elemento puramente resistivo, o fator potência resultou menor que a unidade.

CASO 1.2

A partir do caso 1.1, apresenta-se a forma tradicional de correção do fator de potência através da introdução de um capacitor no circuito da figura 1.2, o qual é mostrado na figura 1.3.

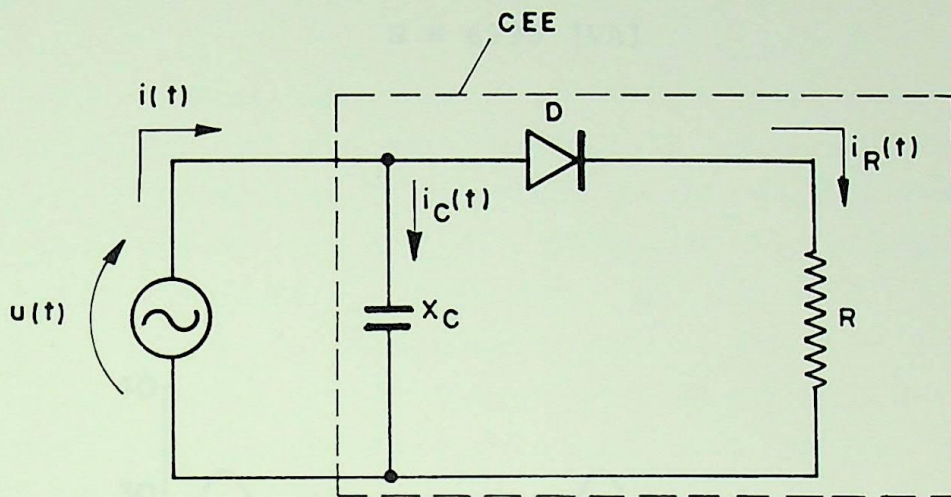


Figura 1.3 - Circuito relativo ao caso 1.2

No circuito apresentado na figura 1.3 admite-se:

$$\begin{aligned} X_C &= 30 \text{ } [\Omega]; \\ R &= 20 \text{ } [\Omega]; \\ U_1 &= 380 \text{ } [V]; \end{aligned}$$

Considerando-se o diodo ideal, pode-se ter duas situações:

- a - Diodo conduzindo : Resistor e capacitor formam a impedância da nova carga (capacitor inserido)
- b - Diodo não-conduzindo: Nessa situação, apenas o capacitor forma a impedância da carga vista pela fonte.

A figura 1.4, a seguir que apresenta a forma de onda de corrente do circuito obtida com o uso do Programa UBC-EFEI. Neste caso, tem-se:

$$P \cong 3600 \text{ [W]}$$

e

$$S \cong 6990 \text{ [VA]}$$

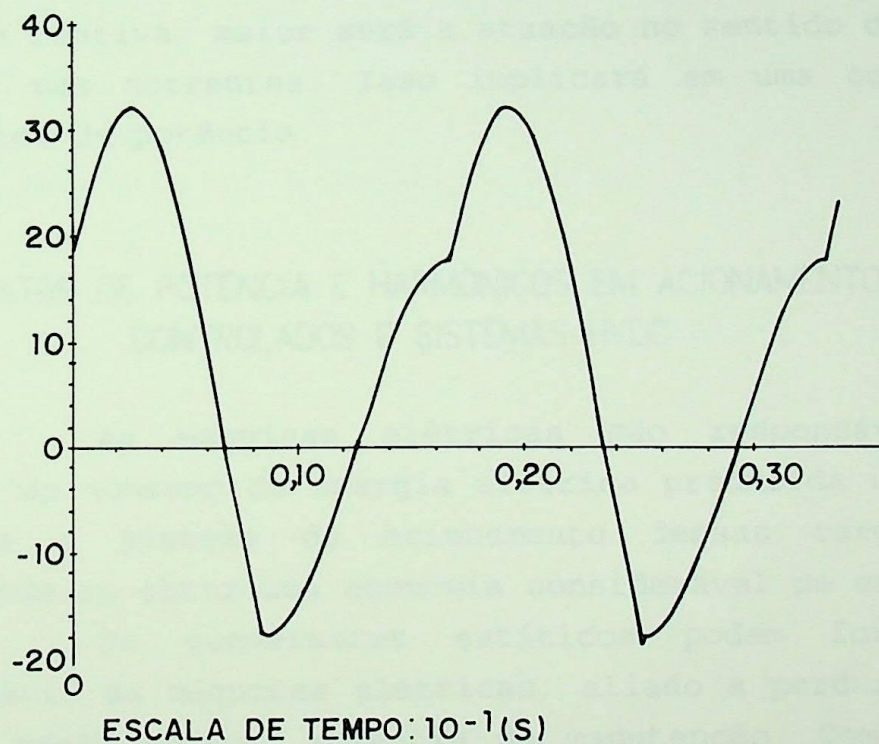


Figura 1.4 - Forma de onda da corrente para circuito da figura 1.3

Estes valores de P e S levam ao FP, que é dado por:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{3600}{6990}$$

$$FP = 0.514$$

Pode ser observado, neste caso pela comparação dos resultados obtidos nos exemplos 1.1 e 1.2, que a inclusão de um capacitor, ao contrário do esperado pelos métodos tradicionais, pioram sensivelmente o fator de potência da instalação. Isso acontece pelas distorções resultantes na corrente na linha, em virtude da introdução da reatância do banco. Ou seja, quanto maior a sua potência reativa, maior será a atuação no sentido de ampliar as distorções nas correntes. Isso implicará em uma conseqüente redução do fator de potência.

1.3. FATOR DE POTÊNCIA E HARMÔNICOS EM ACIONAMENTOS CONTROLADOS E SISTEMAS HVDC

As máquinas elétricas são responsáveis pela maior parcela do consumo da energia elétrica produzida no Brasil. Por isso, se o sistema de acionamento dessas cargas forem eficientes, pode-se obter uma economia considerável de energia.

Os conversores estáticos podem fornecer um controle versátil às máquinas elétricas, aliado a perdas bastante reduzidas, e praticamente, ausência de manutenção. Com isso, as indústrias modernas gradativamente vão cedendo espaço a esses equipamentos. A figura 1.5 mostra a representação esquemática básica do acionamento de máquinas de corrente contínua, enquanto a figura 1.6 apresenta os principais acionamentos de máquinas de corrente alternada.

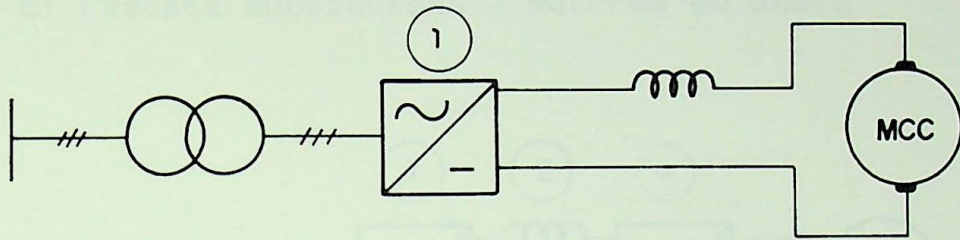
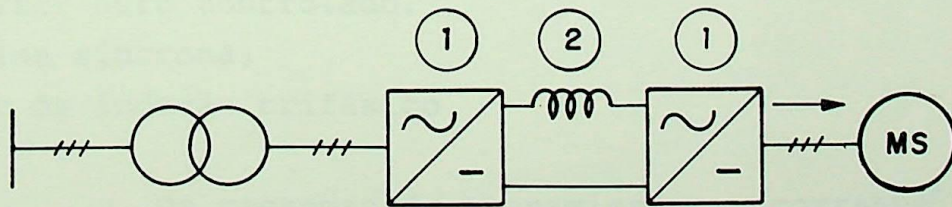
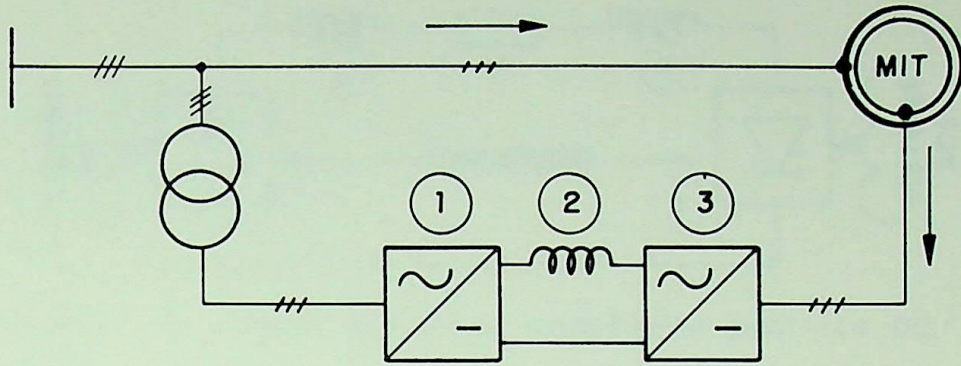


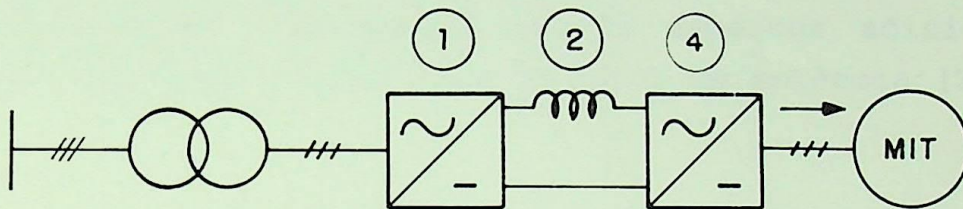
Figura 1.5 - Acionamento de motor DC.



a) Motor síncrono alimentado por conversor



b) Cascata subsíncrona - motores em anéis



c) Sistema inversor - motores em gaiola de esquilo

Figura 1.6 - Sistemas tiristorizados para acionamentos de motores AC

onde:

- 1 - retificador/inversor controlado com comutação pela rede;
- 2 - reator de alisamento;
- 3 - retificador controlado (ou não controlado);
- 4 - inversor auto controlado;
- MS - máquina síncrona;
- MIT - motor de indução trifásico.

Os sistemas de transmissão em corrente contínua, utilizados principalmente para transportar a energia em longas distâncias e acoplar dois sistemas com frequências diferentes, também utilizam os conversores estáticos para transformação da energia elétrica alternada para contínua e vice versa.. A figura 1.7 ilustra um esquema básico de representação desses sistemas.

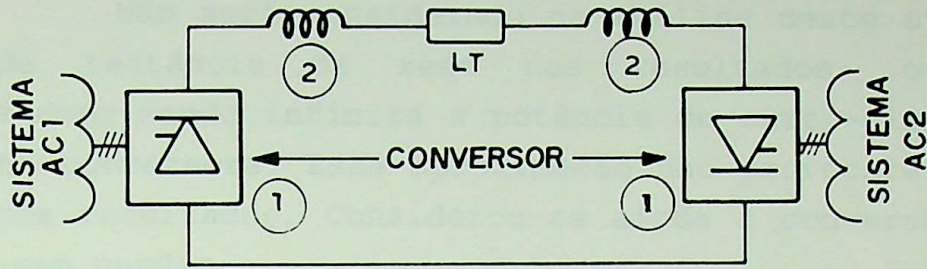


Figura 1.7 - Dois sistemas acoplados por elo DC

Como esses sistemas, basicamente, utilizam o mesmo processo de conversão da energia, os seus fatores de potência são determinados de forma semelhante. Exceção feita a cascata subsíncrona, que possui outros aspectos adicionais que devem ser considerados no cálculo do fator de potência [3].

1.3.1. FATOR DE POTÊNCIA DE SISTEMAS TIRISTORIZADOS

O fator de potência de cargas elétricas especiais depende da distorção existente na entrada da subestação industrial e, naturalmente, da defasagem entre os componentes fundamentais da corrente e da tensão. Torna-se necessário, então, calcular o ângulo de deslocamento do acionamento. Para tal análise utiliza-se o circuito da figura 1.8, onde a carga representada pode ser motores elétricos de corrente contínua, linha de transmissão em corrente contínua com sistema inversor, ou inversores auto-controlados.

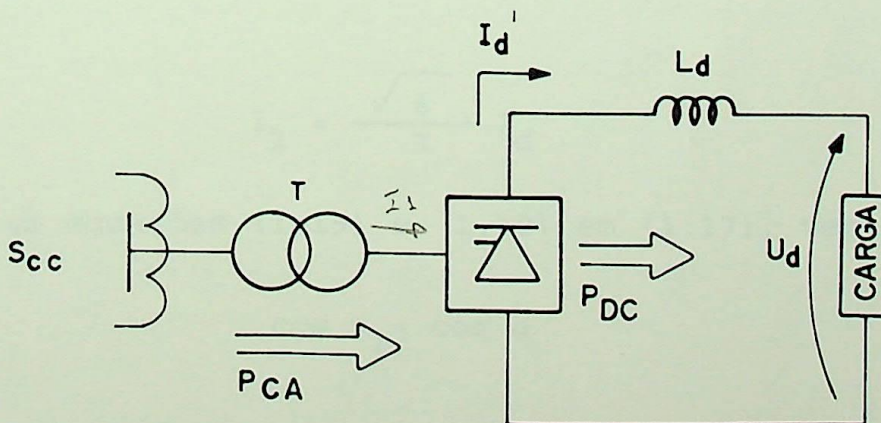


Figura 1.8 - Diagrama unifilar simplificado de sistema retificador

Não será considerado na análise deste sistema a influência da reatância da rede nos resultados, ou seja, considerou-se como sendo infinita a potência de curto-circuito na barra da ponte conversora. Essa aproximação não provocará grandes imprecisões nos resultados, Considerou-se ainda a conversão CA-DC (figura 1.8) sem perdas.

Com base nestas considerações pode-se escrever:

$$P_{CA} = P_{DC}$$

ou ainda,

$$\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = I_d \cdot U_d \quad (1.17)$$

onde:

U_1 - Valor eficaz da tensão fase-fase do sistema;

I_1 - componente fundamental da corrente na fase;

φ_1 - ângulo de deslocamento entre os sinais de tensão e corrente na frequência fundamental.

Conforme [4], pode-se escrever:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha = \frac{3 \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_1 \cdot \cos \alpha \quad (1.18)$$

Decompondo-se a corrente na fase no lado secundário do transformador em Série de Fourier, obtém-se [4] para o valor eficaz de I_{a1} :

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (1.19)$$

Substituindo as equações (1.19) e (1.18) em (1.17), vem:

$$\cos \varphi_1 = \cos \alpha$$

ou,

$$\vartheta_1 = \alpha \quad (1.20)$$

Dessa forma, considerando o fator de distorção introduzido pelos harmônicos de corrente, resulta:

$$FP = \frac{\cos\alpha}{F_{di}} \quad (1.21)$$

Este resultado garante que o ângulo de disparo influencia diretamente o fator de potência.

1.3.2. HARMÔNICOS DE CORRENTE EM PONTES CONVERSORAS

Como o objetivo desse trabalho é analisar os aspectos relativos a energia reativa junto a Concessionária de Energia Elétrica que efetue o suprimento de energia a indústrias utilitárias de cargas elétricas especiais, analisa-se apenas os harmônicos existentes no lado AC devido a estas cargas. Não será abordado o equacionamento que conduzem a obtenção dos componentes harmônicos, mas apresenta-se as suas ordens bem como as amplitudes típicas dos mesmos.

1.3.2.1. HARMÔNICOS CARACTERÍSTICOS

Um sistema retificador a seis pulsos, alimentado por transformador estrela-estrela, delta-estrela, estrela-estrela, ou delta-delta apresentam os seguintes harmônicos de corrente [4]:

$$n = 6K \pm 1, \quad \text{para } K = 1, 2, 3, \dots \quad (1.22)$$

O valor eficaz do componente fundamental vale:

$$I_2 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d = 0,78 \cdot I_d \quad (1.23)$$

A partir de I_1 , pode-se calcular o valor eficaz dos diversos componentes harmônicos. Ou seja:

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (1.24)$$

Esses harmônicos característicos apresentam as seguintes seqüências de fase:

$$n = 6K + 1 \quad (\text{seqüência positiva})$$

$$n = 6K - 1 \quad (\text{seqüência negativa})$$

Um recurso bastante utilizado para a redução dos harmônicos no PAC consiste no acréscimo de pontes conversoras, ampliando conseqüentemente o número de pulsos do sistema retificador. Como exemplo é apresentado na figura 1.9 um diagrama simplificado de um conversor desse tipo.

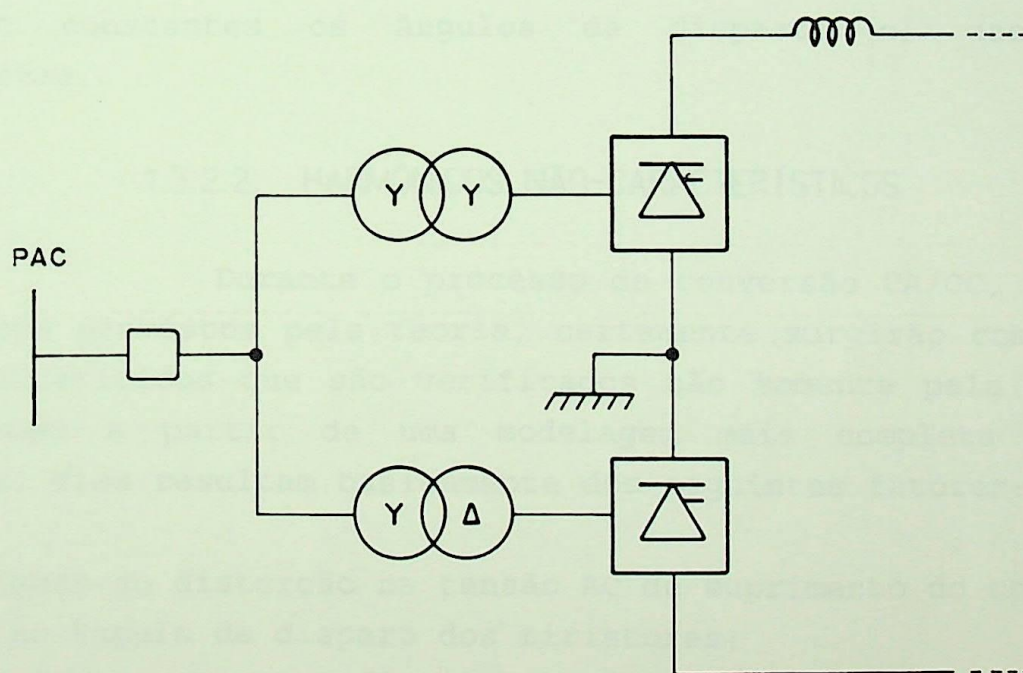


Figura 1.9 - Diagrama unifilar de sistema retificador a doze pulsos

Dessa forma, consegue-se, praticamente, anular os harmônicos que geralmente possuem as mais altas amplitudes, ou seja, os de quinta e sétima ordem. Para conversores a 12 pulsos [4], o espectro harmônico apresentará os seguintes componentes característicos:

$$n = 12 K \pm 1$$

De maneira análoga, para o conversor a 24 pulsos:

$$n = 24 K \pm 1$$

A introdução do efeito da comutação, que é o tempo necessário para a transferência de corrente de um tiristor ao outro, provocará a redução na amplitude desses harmônicos. A referência [4] apresenta gráficos detalhando a evolução das amplitudes dos harmônicos em função do ângulo de sobreposição (μ), mantendo constantes os ângulos de disparo (α) das pontes conversoras.

1.3.2.2. HARMÔNICOS NÃO-CARACTERÍSTICOS

Durante o processo de conversão CA/CC, além dos harmônicos previstos pela teoria, certamente surgirão componentes não-característicos que são verificados não somente pela medição, mas também a partir de uma modelagem mais completa da rede elétrica. Eles resultam basicamente dos seguintes fatores:

- desbalanço ou distorção na tensão AC de suprimento do conversor;
- erros no ângulo de disparo dos tiristores;
- desequilíbrios nas impedâncias AC vistas do conversor.

Dessa forma, é bastante comum, por exemplo, o aparecimento, em instalações reais, de correntes de 3º harmônico e seus múltiplos ímpares. Assim deve-se prever meios de torná-los insignificantes ao sistema de suprimento de energia. O método mais

utilizado seria a utilização de filtros passivos para os componentes harmônicos preponderantes no sistema industrial.

1.3.3. MEDIÇÕES EM SISTEMAS INDUSTRIAIS CONTENDO PONTES CONVERSoras

Apresenta-se a seguir, a título de exemplos de aplicação, o resultado de medições de harmônicos, realizadas em sistema elétrico contendo conversor do tipo retificador em formação de GRAETZ alimentando máquinas de corrente contínua em indústria do ramo de papel e celulose, e sistema inversor para acionamento de motor de indução trifásico, em indústria do ramo têxtil. O equipamento utilizado para medição foi o sistema de aquisição de dados desenvolvido pela GSI - Engenharia e Comércio Ltda., a qual pode também efetuar medições de fator de potência, potência ativa, reativa e aparente.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 1.10, enquanto as formas de onda relativas a esses sistemas estão nas figuras 1.11 e 1.12.

A decomposição em série trigonométrica de Fourier das formas de ondas medidas, apresentam nas tabelas 1.1 e 1.2 os componentes harmônicos de corrente e tensão.

Examinando-se os valores eficazes dos componentes dessas tabelas, através da equação (1.12) que considera os efeitos da distorção da corrente no fator de potência, percebe-se uma operação destes sistemas com baixo fator de potência. Dessa maneira, ocorre uma troca de energia reativa de alta intensidade com a rede elétrica de suprimento de energia.

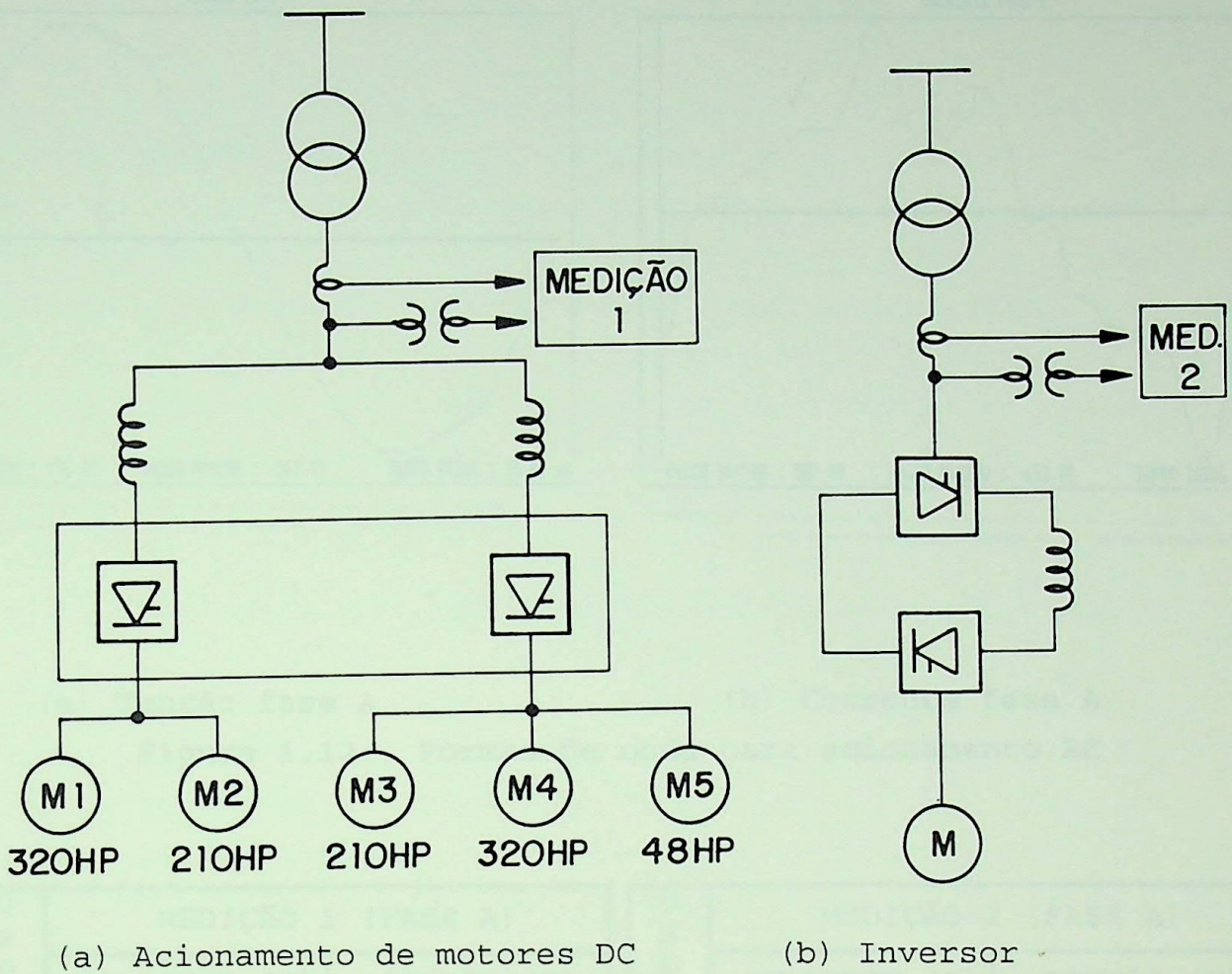
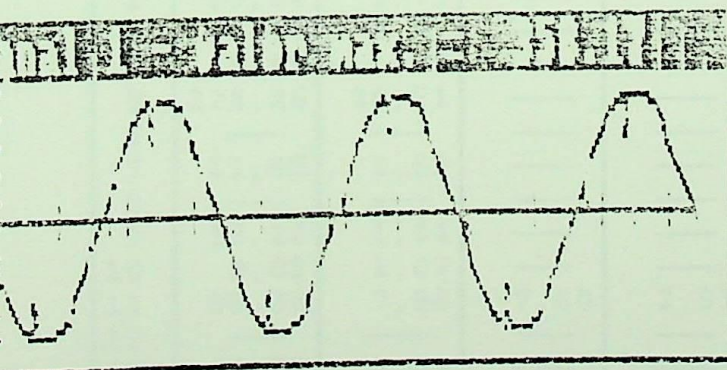
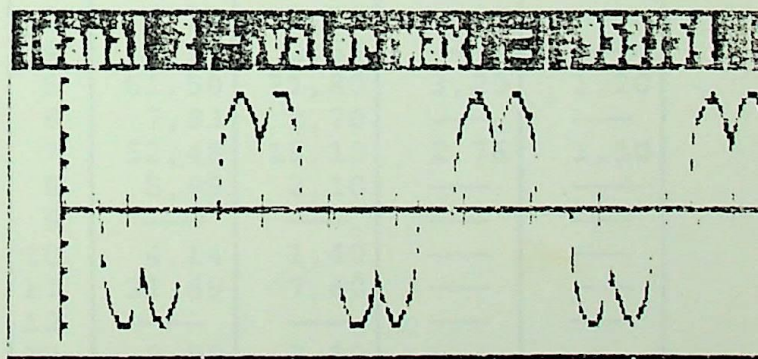


Figura 1.10 - Sistemas de acionamentos relativos às medições efetuadas



(a) Tensão fase A



(b) Corrente fase A

Figura 1.11 - Formas de onda para acionamento DC

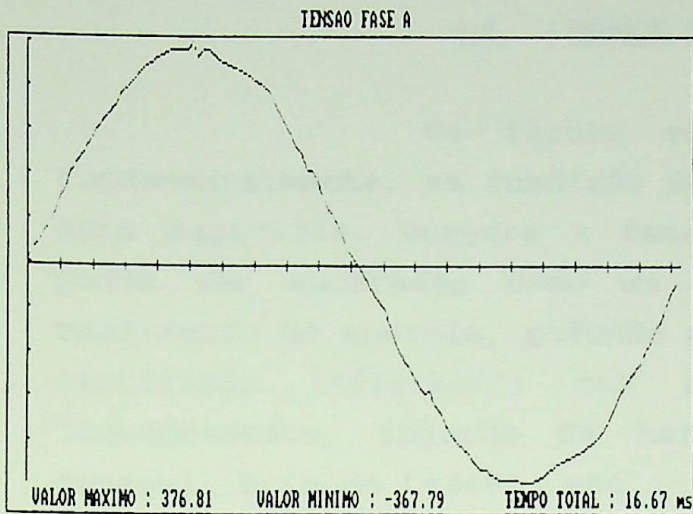


GRÁFICO 1 : Forma de onda de tensão de tensão na Fase A no secundário de T114.
Amostragem correspondente a Medição N.º 77 - B011162ED1204.106/109.

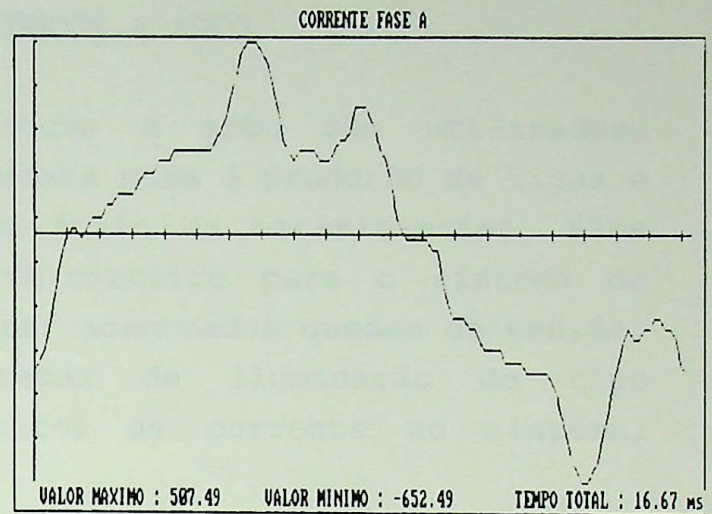


GRÁFICO 2 : Forma de onda de corrente de corrente na Fase A no secundário de T114.
Amostragem correspondente a Medição N.º 77 - B011162ED1204.106/109.

(a) Tensão fase A

(b) Corrente fase A

Figura 1.12 - Formas de onda para acionamento AC

O R D E M	MEDIÇÃO 1 (FASE A)			
	CORRENTE [A]		TENSÃO [V]	
	I [RMS]	% FUND	U [RMS]	% FUND
0	5,06	0,68	-1,25	-0,47
1	745,75	100,00	261,27	100,00
2	13,04	1,75	—	—
3	22,17	2,97	—	—
4	8,85	1,19	—	—
5	228,26	30,61	—	—
6	—	—	—	—
7	11,40	1,53	—	—
8	—	—	—	—
9	12,22	1,64	—	—
10	8,01	1,07	—	—
11	59,38	7,96	7,60	2,91
12	—	—	—	—
13	18,75	2,51	—	—

Tabela 1.1
Harmônicos no Acionamento DC

O R D E M	MEDIÇÃO 2 (FASE A)			
	CORRENTE [A]		TENSÃO [V]	
	I [RMS]	% FUND	U [RMS]	% FUND
0	60,15	20,80	-0,93	-0,40
1	289,09	100,00	258,68	100,00
2	26,17	9,10	—	—
3	6,23	2,20	—	—
4	7,14	2,50	—	—
5	61,50	21,80	3,20	1,20
6	7,83	2,70	—	—
7	52,46	18,10	2,76	1,10
8	5,99	2,10	—	—
9	—	—	—	—
10	4,14	1,40	—	—
11	21,89	7,60	—	—
12	—	—	—	—
13	9,00	3,10	—	—

Tabela 1.2
Harmônicos no Sistema Inversor

1.4. FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

Os fornos elétricos a arco são utilizados, fundamentalmente, na fundição de sucata para a produção de ligas e aços especiais. Durante a fase de fusão da matéria-prima, eles podem ser encarados como um curto-circuito para o sistema de suprimento de energia, podendo causar acentuadas quedas de tensão, cintilação ("flicker") nos sistemas de iluminação do tipo incandescente, injeção de harmônicos de corrente no sistema, desequilíbrio de tensão, etc.

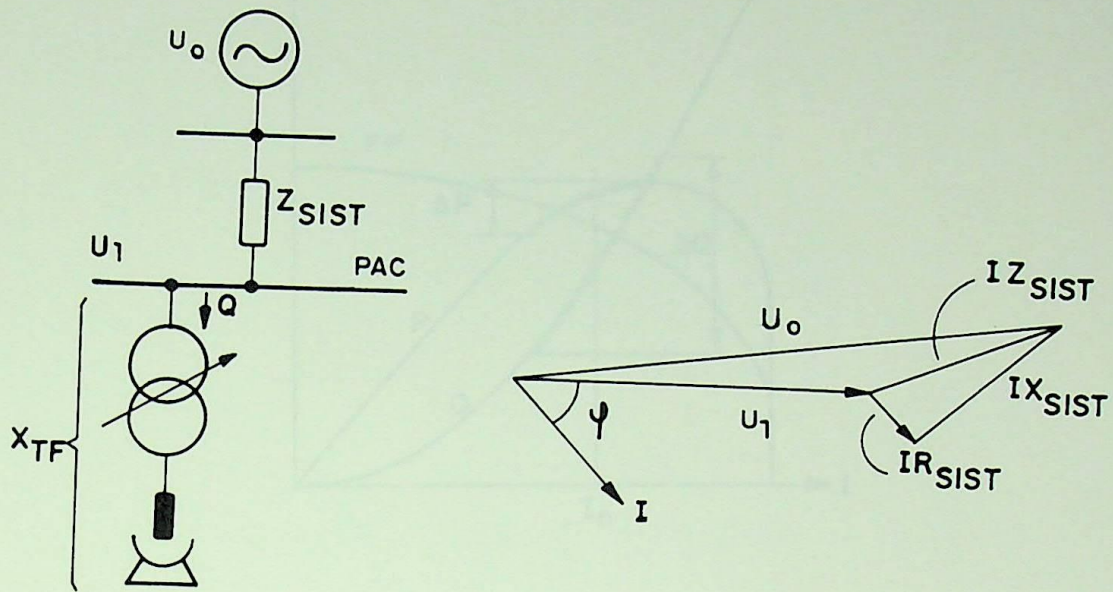
1.4.1. VARIAÇÕES DE TENSÃO ORIGINADAS PELOS FORNOS A ARCO

As variações rápidas da tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) principalmente durante o período inicial da operação de fusão do forno, são oriundas das flutuações da corrente que ocorrem em virtude da instabilidade do arco. A figura 1.13 ilustra um diagrama unifilar simplificado de um forno, com o diagrama fasorial correspondente.

Baseando-se na figura 1.13(a), e na hipótese de curto-circuito trifásico franco dos três eletrodos, e desprezando-se as resistências, tem-se, aproximadamente, a variação de tensão (ΔU) relativamente ao componente fundamental da tensão.

$$\frac{\Delta U}{U_1} = \frac{Q}{S_{PAC}} = \frac{X_{sist}}{X_{sist} + X_{tf}} \quad (1.25)$$

Em [5], são fornecidos os limites máximos de variação de tensão permitida. As variações de regime permanente, devem ser de até 2%. Para evitar-se "flicker" no sistema de iluminação incandescente, a maior variação da tensão durante um tempo máximo de 1% do tempo de processo de fusão, é de 0.25%.



(a) Diagrama unifilar

(b) Diagrama fasorial

Figura 1.13 - Verificação da queda de tensão

Na figura 1.13 e equação 1.25 tem-se:

- ΔU - variação da tensão na barra do PAC
- I - corrente do forno;
- Q - potência reativa na frequência fundamental necessária ao forno;
- Z_{SIST} - impedância do sistema;
- S_{PAC} - potência de curto-circuito no PAC;
- U_1 - componente fundamental da tensão no PAC;
- U_0 - tensão "atrás" da impedância do sistema;
- X_{TF} - reatância do forno e transformador;
- φ - ângulo de fase entre a tensão e corrente no forno.

A figura 1.14 apresenta a curva de carga típica de um forno a arco, onde pode-se perceber a facilidade de ocorrer grandes variações na potência reativa.

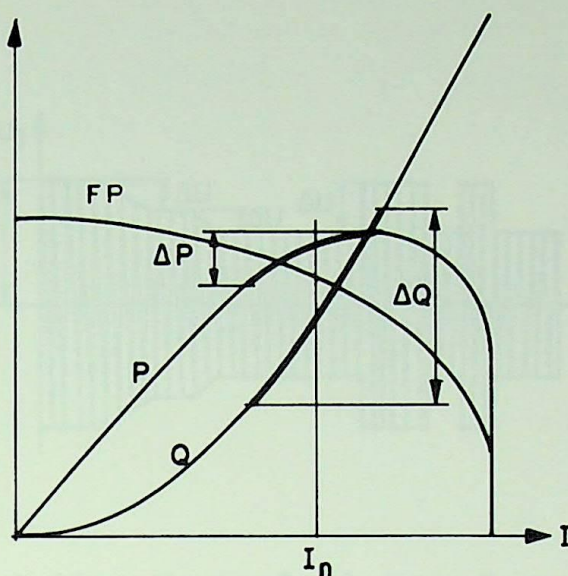


Figura 1.14 - Curvas características de um forno a arco direto [5]

Na figura 1.14 tem-se:

- I - corrente de carga do forno (eletrodo);
- I_N - corrente nominal do forno;
- P - potência ativa do forno;
- Q - potência reativa trocada entre o forno e a rede elétrica;
- ΔP - variação da potência ativa consumida;
- ΔQ - variação da potência reativa;
- FP - fator de potência.

Observa-se, pela figura 1.14, que para grandes variações da corrente, em torno da nominal, a potência ativa varia muito pouco se comparada a potência reativa e, conseqüentemente, a tensão do PAC também será fortemente influenciada. Estas variações tendem a ocorrer na frequência de 5 a 10 [Hz], sendo então responsáveis pelo fenômeno, conhecido como "EFEITO DE CINTILAÇÃO" ("FLICKER"), o qual causa incômodo ao olho humano pelo seu efeito em lâmpadas incandescentes. As figuras 1.15 e 1.16 ilustram a forma de onda de tensão do PAC resultante da operação de fornos elétricos a arco.

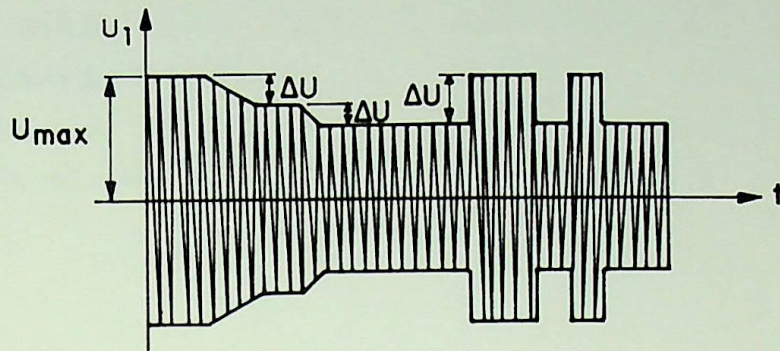


Figura 1.15 - Variação da tensão no PAC

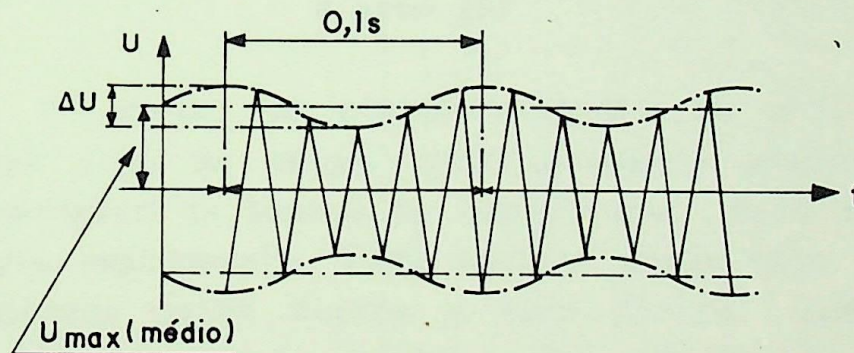


Figura 1.16 - Variação da tensão no PAC

Esse efeito deve ser compensado de forma adequada, pois além do prejuízo a outros consumidores servidos do mesmo barramento, provoca ainda uma operação com baixo fator de potência.

1.4.2. "CONSUMO" DE POTÊNCIA REATIVA

O forno a arco durante a fusão da matéria-prima, normalmente opera com fator de potência em torno de 70%, para que

o arco formado tenha características estáveis [5]. Dessa forma, a carga em questão já se apresenta como grande "consumidora" de reativos. Além disso, como visto no item anterior, a corrente do forno, e conseqüentemente a potência reativa, flutuam substancialmente. A figura 1.17 mostra a variação típica de potência reativa em um forno elétrico a arco.

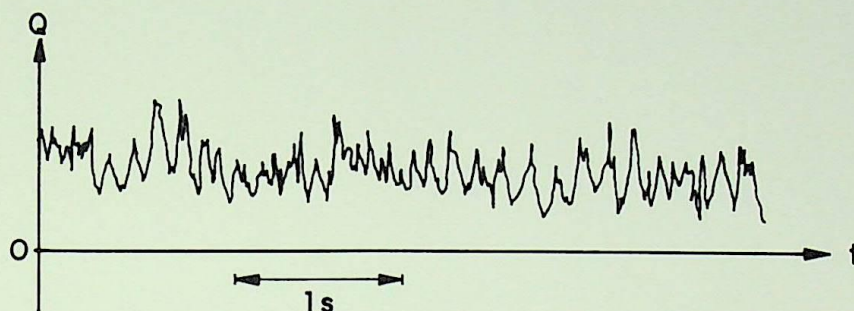


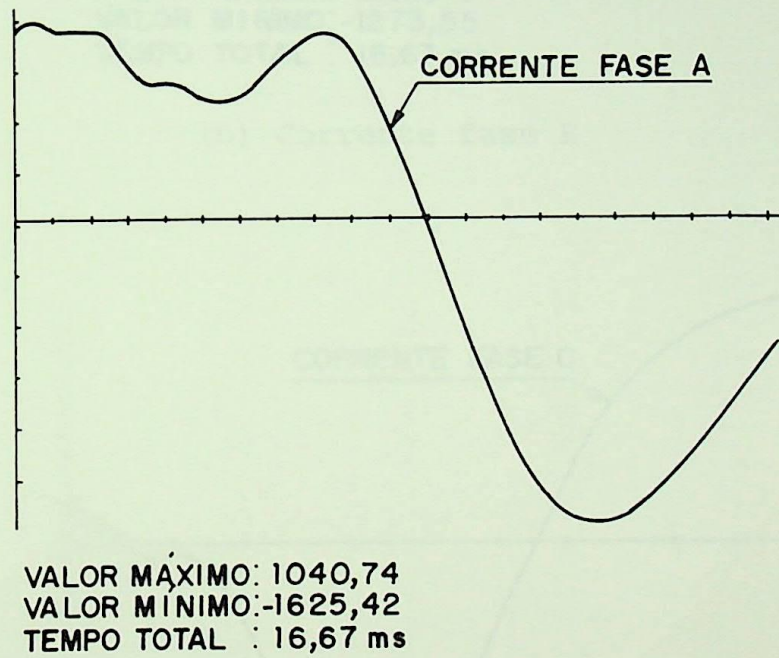
Figura 1.17 - Variação do consumo de potência de forno a arco [5]

Assim, na prática encontra-se dificuldades em compensar esse tipo de carga, principalmente quando se faz o chaveamento mecânico de bancos de capacitores, pois as variações acontecem muito rapidamente. Para ampliar ainda mais o quadro de problemas causados pelos fornos a arco direto, também ocorrem injeções de harmônicos no sistema de suprimento de energia causando diversos tipos de distúrbios.

1.4.3. GERAÇÃO DE HARMÔNICOS

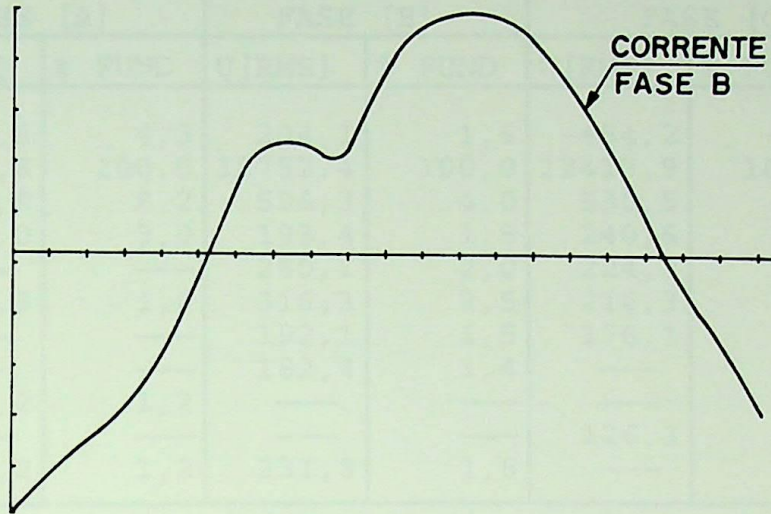
Em virtude do caráter não-linear da impedância do arco, ocorre geração de harmônicos por parte dos fornos, cujas ordens e amplitudes dependem da sua fase de operação.

Utilizando-se do sistema de aquisição de dados citado no item 1.3.3, foram realizadas medições em forno de 30 toneladas cujas formas de onda das correntes nas fases são mostradas na figura 1.18.



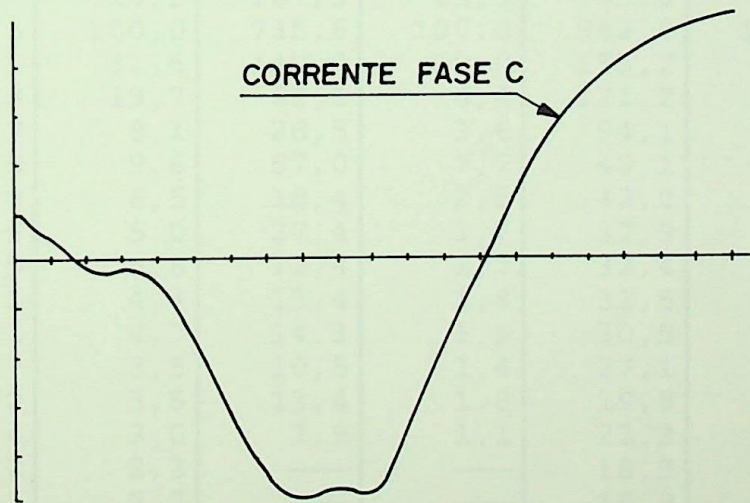
(a) Corrente fase A

Figura 1.18 - Formas de onda das correntes do forno
(continua na página seguinte)



VALOR MAXIMO: 1203,45
 VALOR MINIMO: -1273,55
 TEMPO TOTAL : 16,67 ms

(b) Corrente fase B



VALOR MAXIMO: 1452,25
 VALOR MINIMO: 1480,56
 TEMPO TOTAL : 16,67

(c) Corrente fase C

Figura 1.18 - Formas de onda das correntes do forno

A partir dessas medições, obteve-se as tabelas 1.3 e 1.4 a seguir.

O R D E M	TENSÃO [V]					
	FASE [A]		FASE [B]		FASE [C]	
	U [RMS]	% FUND	U [RMS]	% FUND	U [RMS]	% FUND
0	527,5	4,3	204,1	1,6	-454,2	-3,7
1	12335,6	100,0	12752,4	100,0	12413,9	100,0
2	1008,0	8,2	506,3	4,0	530,5	4,3
3	370,0	3,0	193,4	1,5	240,6	1,9
4	—	—	260,1	2,0	224,9	1,8
5	201,3	1,6	316,3	2,5	210,3	1,7
7	—	—	192,1	1,5	176,1	1,4
9	—	—	182,4	1,4	—	—
10	146,2	1,2	—	—	—	—
11	—	—	—	—	126,3	1,0
33	143,2	1,2	231,8	1,8	—	—

Tabela I.3 - Harmônicos de Tensão nas Fases do Forno a Arco

O R D E M	CORRENTE [A]					
	FASE [A]		FASE [B]		FASE [C]	
	I [RMS]	% FUND	I [RMS]	% FUND	I [RMS]	% FUND
0	-96,7	-10,5	187,3	25,5	-83,6	8,9
1	921,3	100,0	735,5	100,0	942,8	100,0
2	291,5	31,6	140,0	19,0	153,2	16,2
3	181,8	19,7	62,1	8,4	121,2	12,9
4	74,7	8,1	26,5	3,6	94,1	10,0
5	88,5	9,6	57,0	7,7	48,1	5,1
6	59,9	6,5	18,4	2,5	42,2	4,5
7	46,5	5,0	27,4	3,7	32,9	3,5
8	43,9	4,8	12,4	1,7	32,4	3,4
9	40,1	4,4	13,4	1,8	31,5	3,3
10	43,1	4,7	14,3	1,9	30,5	3,2
11	32,7	3,5	10,5	1,4	27,1	2,9
12	32,2	3,5	13,4	1,8	19,8	2,1
13	27,4	3,0	7,9	1,1	22,3	2,4
14	21,2	2,3	—	—	18,5	2,0
15	25,3	2,7	—	—	18,9	2,0
16	26,6	2,9	10,6	1,4	15,0	1,6
17	21,8	2,4	—	—	15,3	1,6
18	19,0	2,1	—	—	14,2	1,5
19	22,0	2,4	7,9	1,1	14,0	1,5
20	16,1	1,7	—	—	13,9	1,5
21	17,3	1,9	—	—	13,2	1,4
22	16,5	1,8	—	—	11,3	1,2
23	14,1	1,5	—	—	11,5	1,2

Tabela 1.4 - Harmônicos de Corrente em Fornos a Arco

1.5. CONCLUSÕES ACERCA DA PRESENÇA DE CARGAS NÃO-LINEARES NO SISTEMA ELÉTRICO

Conforme pode ser observado, tanto os acionamentos de motores elétricos, quanto os fornos a arco direto, causam diversos inconvenientes aos sistemas elétricos.

A energia reativa trocada entre os conversores e a rede elétrica de suprimento varia em função do ângulo de disparo de seus tiristores. Os fornos a arco também variam seu consumo de potência reativa constantemente, principalmente na fase inicial de fusão da sucata, podendo originar inclusive flicker em lâmpadas incandescentes, causando incômodo aos consumidores ligados ao mesmo barramento.

Os harmônicos presentes sempre nos sistemas elétricos que alimentam estas cargas, além de contribuir para o baixo fator de potência, podem provocar ressonâncias quando na presença de bancos de capacitores [5].

Assim, para uma correção eficaz do fator de potência de cargas elétricas não-lineares, torna-se necessário a utilização de compensadores estáticos. Esses equipamentos são capazes de acompanhar as variações de potência reativa como também contribuir para a redução dos níveis de desequilíbrio e flutuações de tensão existentes nos sistemas elétricos.

CAPÍTULO 2

COMPENSADORES ESTÁTICOS "SHUNT" DE POTÊNCIA REATIVA

2.1. INTRODUÇÃO

Com a portaria nº 1569 do DNAEE, em que alterou-se o fator de potência de referência brasileiro para 92%, a partir de abril de 1994, cresce o interesse em torno dos sistemas estáticos shunt para a compensação de energia reativa. As razões que conduzem a isso são os problemas de variações contínuas da demanda de reativos das cargas não-lineares, abordados nos seus aspectos mais importantes no capítulo anterior. Além disto a citada portaria do DNAEE aponta para uma futura (abril de 1996) cobrança do consumo de energia reativa, considerando-se períodos de medições de hora a hora. Dessa forma, mesmo as indústrias que possuem cargas normais, porém variáveis em termos de potência, serão levadas a efetuar uma análise técnico-econômico no sentido da utilização desses tipos de instalações. Isto acontece em virtude dos equipamentos tradicionais que executam essa tarefa mostrarem-se limitados para estas condições operacionais.

Uma opção bastante difundida são os bancos de capacitores chaveados mecanicamente através de disjuntores ou contatores. Nesse caso, principalmente quando existirem cargas altamente variáveis, certamente ocorrerão transitórios na operação de energização e desenergização desses componentes que limitarão o seu emprego. Isso acontece em virtude do chaveamento de correntes capacitivas provocarem solicitações dielétricas em disjuntores dos bancos que, somado ao aumento do número da frequência das manobras, conduzirão a redução da vida útil desses dispositivos. Além disso, em redes com alto conteúdo harmônico, poderão haver sérias possibilidades de ocorrerem ressonâncias paralela entre os capacitores instalados e a reatância indutiva do sistema elétrico [5]. Uma outra opção por vezes adotada é a utilização de compensadores síncronos, que apesar de realizar uma compensação eficiente e contínua de cargas balanceadas, são incapazes de

corrigir as correntes de sequência negativa, responsáveis pelo desequilíbrio de certos carregamentos, além de possuírem tempo de resposta elevado. Dessa forma, quando deseja-se compensar cargas desequilibradas, esse equipamento não se mostra adequado. Além disso, trata-se de uma instalação de alto custo, necessitando de onerosa e frequente manutenção.

Os compensadores estáticos são capazes de compensar o consumo de reativos e balancear cargas desequilibradas de forma extremamente rápida e eficiente. Basicamente existem diversos tipos de compensadores estáticos "shunt" que efetuam estas funções. No entanto, esse trabalho tratará dos tipos mais usuais de utilização ou seja, os Capacitores Chaveados a Tiristores (CCT) e os Reatores Controlados a Tiristores (RCT). Esses últimos utilizados conjuntamente com capacitores fixos ou chaveados mecanicamente. Assim, será mostrado os princípios teóricos básicos que regem a compensação efetuada por esses tipos de equipamentos, através de dois caminhos: equacionamento da compensação da carga através de impedâncias variáveis e em termos de componentes simétricos da corrente de carga. A seguir, aborda-se o CCT e o RCT em seus aspectos operacionais importantes e arranjos básicos utilizados, bem como os sistemas de controle típicos.

2.2. PRINCÍPIOS DA COMPENSAÇÃO DE CARGAS ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIAS VARIÁVEIS

Apesar dos componentes estáticos shunt também atuarem como suporte de tensão para linhas de transmissão, serão abordadas apenas as características desse equipamento quanto a sua função como compensador de grandes cargas industriais. Esses equipamentos devem equilibrar a corrente de carga, atenuando as possíveis flutuações da tensão e elevando aos níveis desejados o fator de potência da instalação.

2.2.1. COMPENSAÇÃO DA CARGA ATRAVÉS DE ADMITÂNCIAS REATIVAS

Considere uma carga conectada em estrela isolada, com impedâncias de fase Z_a , Z_b e Z_c . O equivalente delta dessa carga, com as suas admitâncias equivalentes, é mostrado na figura 2.1.

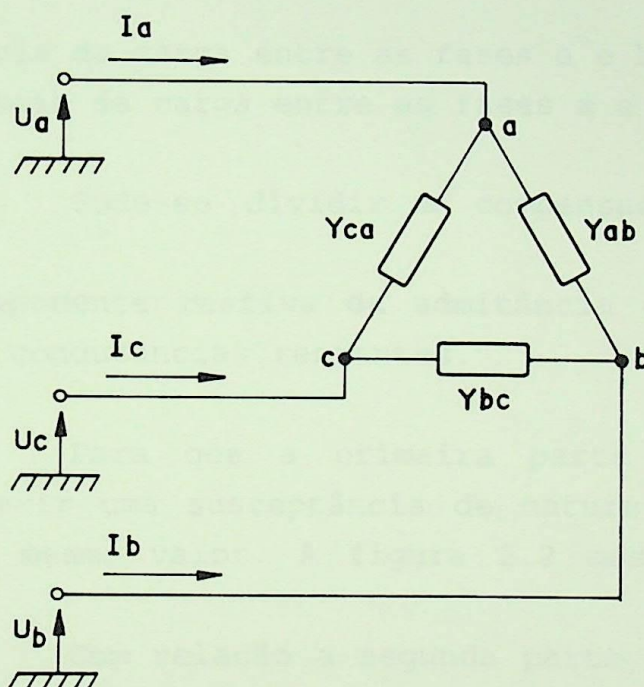


Figura 2.1 - Equivalente delta de uma carga conectada em estrela isolada

Será admitido que estas admitâncias são invariantes por um curto período de tempo, ou seja, representam um instante qualquer da demanda de potência aparente da rede de suprimento de energia. Além disso, supõe-se ainda que as três admitâncias são diferentes entre si. Elas representam, dessa forma impedâncias desbalanceadas em regime permanente, supridas por

fontes cujas tensões estão em sequência direta de fase, e com a fase "a" utilizada como referência.

Portanto, o compensador deverá fornecer correntes de fase reativas, que combinadas com as correntes de carga, totalizarão correntes fornecidas pela rede equilibradas e puramente resistivas.

Considerando apenas as fases "a" e "b", tem-se para a admitância de carga entre essas fases:

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} \quad (2.1)$$

onde:

G_{ab} - condutância da carga entre as fases a e b;

B_{ab} - susceptância da carga entre as fases a e b.

Pode-se dividir a compensação em duas partes distintas:

- anular a componente reativa da admitância de carga e,
- balancear as condutâncias restantes.

Para que a primeira parte seja satisfeita é necessário inserir uma susceptância de natureza contrária àquela da carga e de mesmo valor. A figura 2.2 mostra como isso deve ocorrer.

Com relação a segunda parte da compensação, uma carga torna-se balanceada, vista da rede AC, quando uma susceptância capacitiva é inserida entre as fases "b" e "c", e outra susceptância indutiva é conectada entre as fases "c" e "a". As expressões que as definem são:

$$B_{bc}^{(ab)} = \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

$$B_{ca}^{(ab)} = \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Os índices utilizados (ab) indicam que as susceptâncias inseridas são utilizadas para compensar a carga equivalente conectada entre as fases "a" e "b".

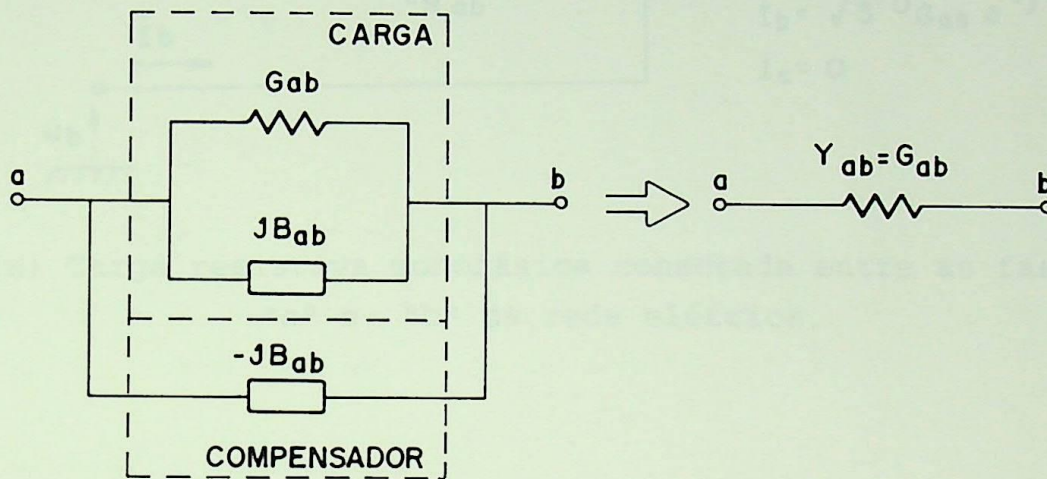


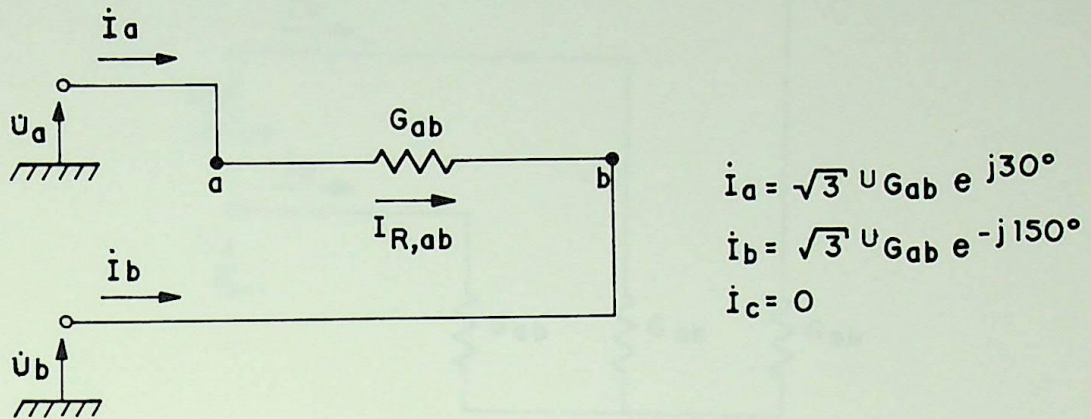
Figura 2.2 - Compensação da susceptância da carga

É importante observar que a demanda de potência média absorvida da rede pela carga acontece de acordo com a expressão:

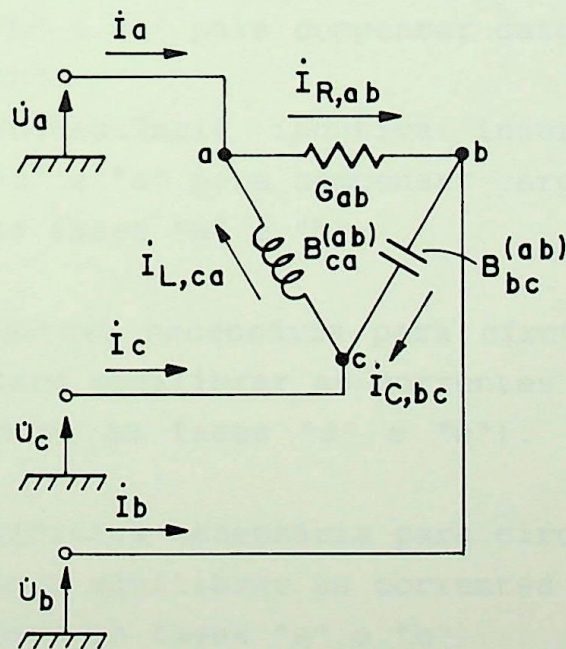
$$P = 3 \cdot U^2 \cdot G_{ab} \quad (2.4)$$

Essa, naturalmente, se utiliza de valores fase-fase para a tensão, representando a carga monofásica anterior à compensação, e deve se manter constante após a introdução das susceptâncias compensadoras já mencionadas.

A figura 2.3 ilustra, o esquema do compensador, necessário para a transformação de uma carga do tipo resistiva monofásica em uma carga trifásica equilibrada.

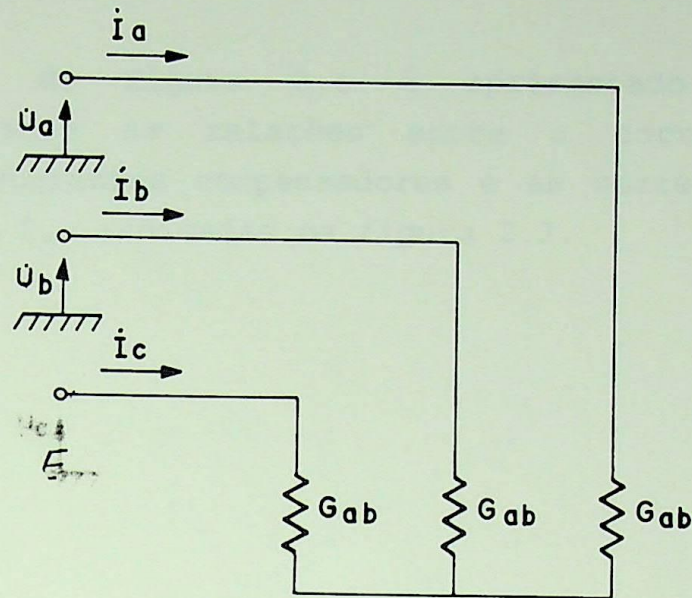


(a) Carga resistiva monofásica conectada entre as fases "a" e "b" da rede elétrica.



(b) Circuito com susceptâncias compensadoras

Figura 2.3 - Transformação de uma carga resistiva monofásica em uma trifásica balanceada (continua página seguinte).



(c) Carga trifásica balanceada resultante

Figura 2.3 - Transformação de uma carga resistiva monofásica em uma trifásica balanceada (continuação)

onde, na figura 2.3(b) tem-se:

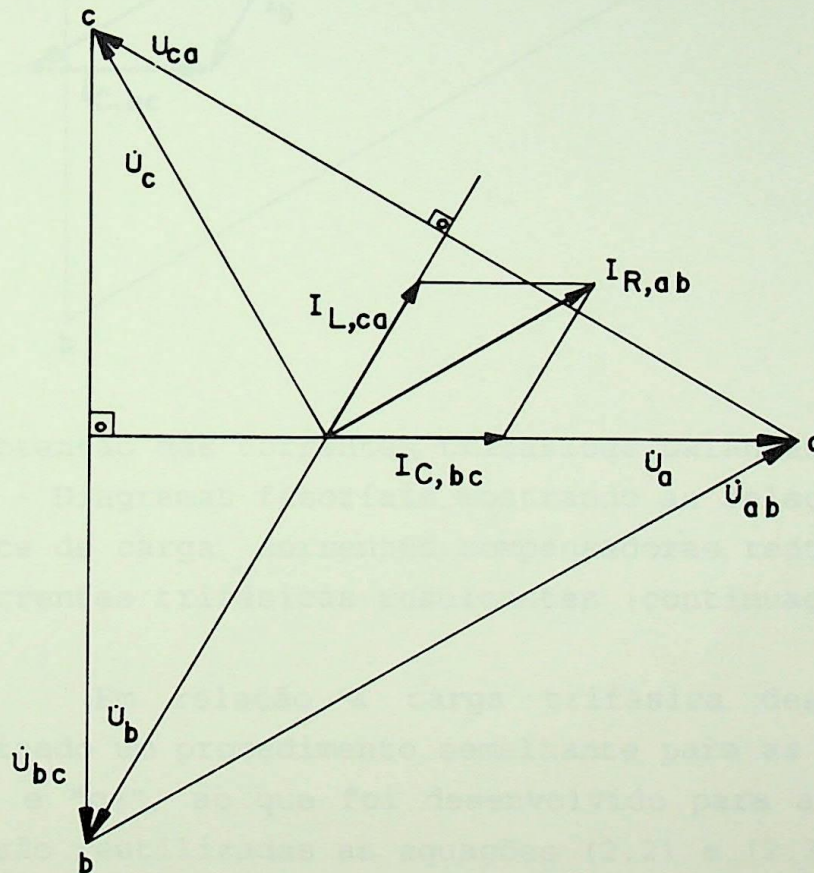
$$B_{bc}^{(ab)} = + \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} = \text{susceptância capacitiva inserida entre as fases "b" e "c" para compensar carga entre fases "a" e "b"};$$

$$B_{ca}^{(ab)} = - \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} = \text{susceptância indutiva inserida entre as fases "c" e "a" para compensar carga instalada entre as fases "a" e "b"};$$

$I_{L,ca}$ = Corrente indutiva necessária para circular entre as fases "c" e "a", para equilibrar as correntes de fase (para carga conectada entre as fases "a" e "b").

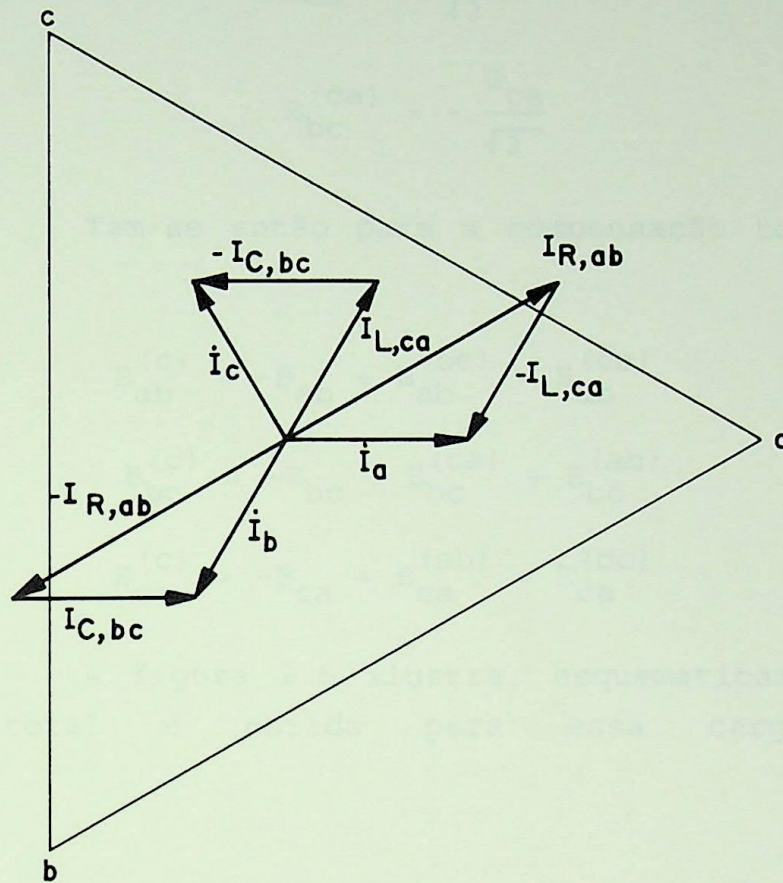
$I_{C,bc}$ = Corrente capacitiva necessária para circular entre as fases "b" e "c", para equilibrar as correntes de fase (para carga conectada entre as fases "a" e "b").

Na figura 2.4 é apresentado os diagramas fasoriais mostrando as relações entre a corrente de carga monofásica, as correntes compensadores e as correntes trifásicas da rede \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c , indicadas na figura 2.3.



a) Relação entre a corrente de carga monofásica e as correntes compensadoras

Figura 2.4 - Diagramas fasoriais mostrando as relações entre a corrente de carga, correntes compensadoras reativas e as correntes trifásicas resultantes (continua na página seguinte).



b) Obtenção das correntes trifásicas balanceadas

Figura 2.4 - Diagramas fasoriais mostrando as relações entre a corrente de carga, correntes compensadoras reativas e as correntes trifásicas resultantes (continuação).

Em relação a carga trifásica desequilibrada, deve ser realizado um procedimento semelhante para as cargas entre as fases "bc" e "ca", ao que foi desenvolvido para a carga "ab". Basicamente, são reutilizadas as equações (2.2) e (2.3). Assim:

$$B_{ca}^{(bc)} = \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

$$B_{ab}^{(bc)} = -\frac{G_{bc}}{\sqrt{3}}$$

e

$$B_{ab}^{(ca)} = \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

$$B_{bc}^{(ca)} = -\frac{G_{ca}}{\sqrt{3}}$$

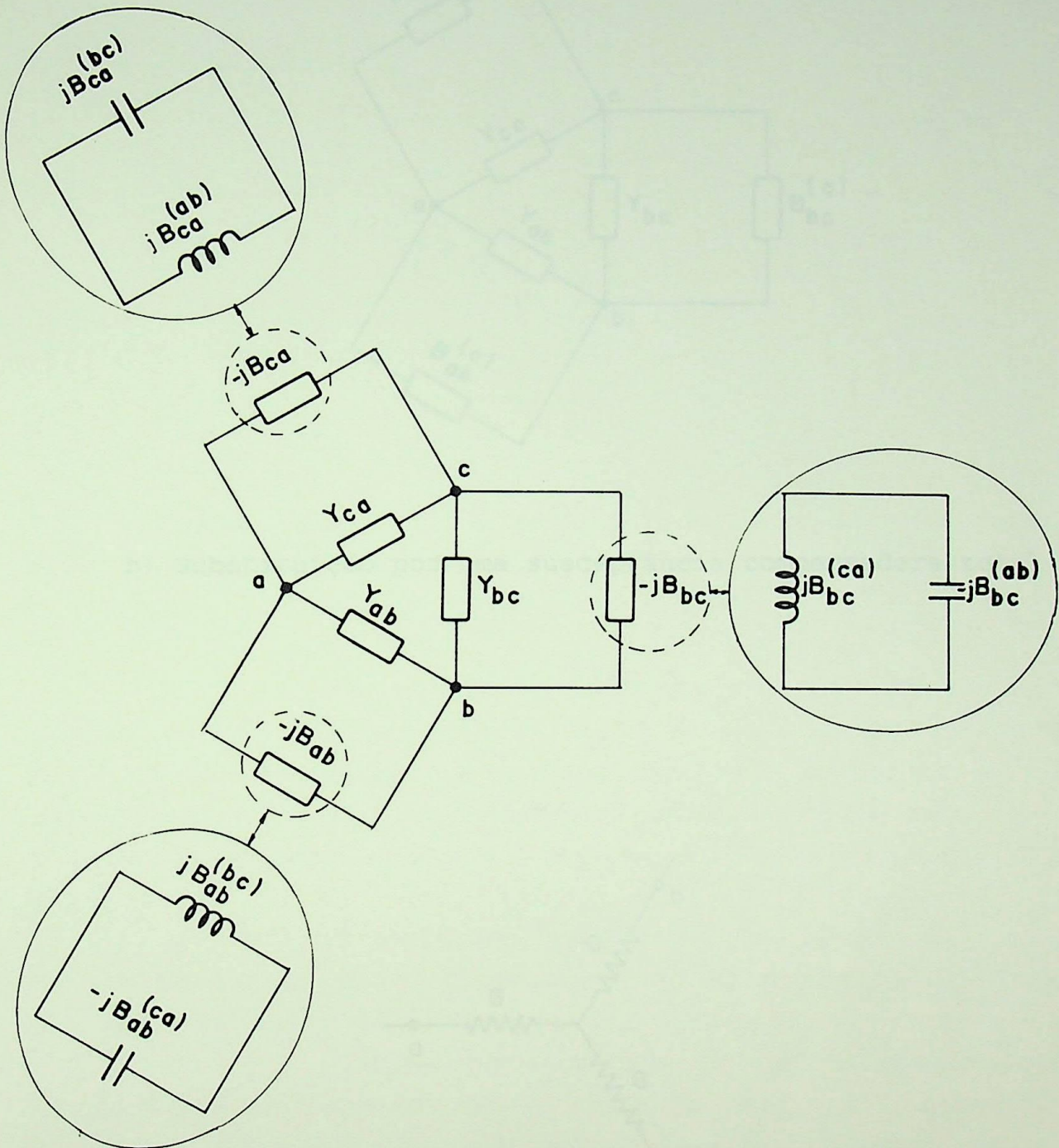
Tem-se então para a compensação total das três fases:

$$B_{ab}^{(c)} = -B_{ab} + B_{ab}^{(bc)} + B_{ab}^{(ca)}$$

$$B_{bc}^{(c)} = -B_{bc} + B_{bc}^{(ca)} + B_{bc}^{(ab)} \quad (2.7)$$

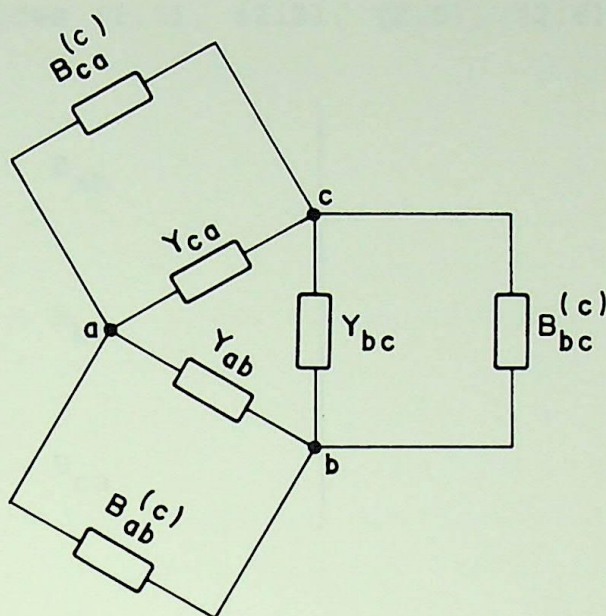
$$B_{ca}^{(c)} = -B_{ca} + B_{ca}^{(ab)} + B_{ca}^{(bc)}$$

A figura 2.5 ilustra, esquematicamente, como a compensação total é obtida para essa carga trifásica desbalanceada.

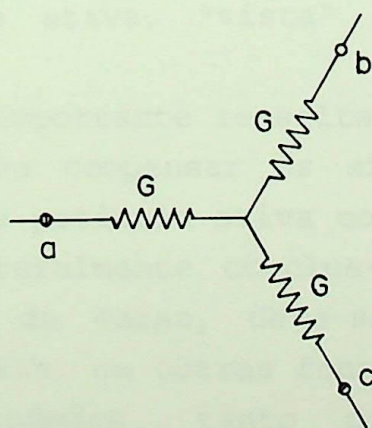


a) Inclusão de susceptâncias compensadoras

Figura 2.5 - Compensação total da carga (continua na página seguinte)



b) Substituição por uma susceptância compensadora total



c) Carga trifásica do tipo resistivo que deverá resultar balanceada

Figura 2.5 - Compensação total da carga (continuação)

Utilizando as equações (2.2), (2.3), (2.5), (2.6) e (2.7) vem:

$$\left. \begin{aligned} B_{ab}^{(c)} &= \frac{G_{ca} - G_{bc}}{\sqrt{3}} - B_{ab} \\ B_{bc}^{(c)} &= \frac{G_{ab} - G_{ca}}{\sqrt{3}} - B_{bc} \\ B_{ca}^{(c)} &= \frac{G_{bc} - G_{ab}}{\sqrt{3}} - B_{ca} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

$$G = G_{ab} + G_{bc} + G_{ca} \quad (2.9)$$

$B_{ab}^{(c)}$ = susceptância total a ser inserida entre as três fases para compensar carga conectada entre as fases "a" e "b" (ídem para as fases "b" e "c", "c" e "a").

As equações (2.8) definem as necessidades de compensação em termos da parte ativa e reativa da admitância de carga. Essas susceptâncias que são inseridas são suficientes para transformar qualquer carga desbalanceada e reativa, em uma carga balanceada puramente ativa, "vista" da rede de suprimento de energia.

É importante ressaltar, que mesmo com a inclusão de susceptâncias para compensar os efeitos mencionados, não há alteração do valor da potência ativa consumida.

Naturalmente conclue-se que na consideração de variações dinâmicas da carga, deve-se introduzir susceptâncias compensadoras variáveis, ou outras fontes controláveis, permitindo uma compensação dinâmica, tanto do fator de potência da instalação, quanto dos possíveis desequilíbrios da corrente.

2.2.2. EQUACIONAMENTO DA COMPENSAÇÃO EM TERMOS DE COMPONENTES SIMÉTRICOS DA CORRENTE DE CARGA

É formulado neste ítem, um equacionamento básico para obter-se as susceptâncias compensadoras da correção do fator de potência e do desequilíbrio da carga, em função dos valores das componentes simétricas da corrente necessária ao seu suprimento. Esse equacionamento complementa aquele realizado no ítem anterior, e confirma muito dos conceitos alí introduzidos.

A figura 2.6 ilustra uma rede de suprimento alimentando uma carga trifásica desbalanceada com fator de potência indutivo, sendo compensada por susceptâncias.

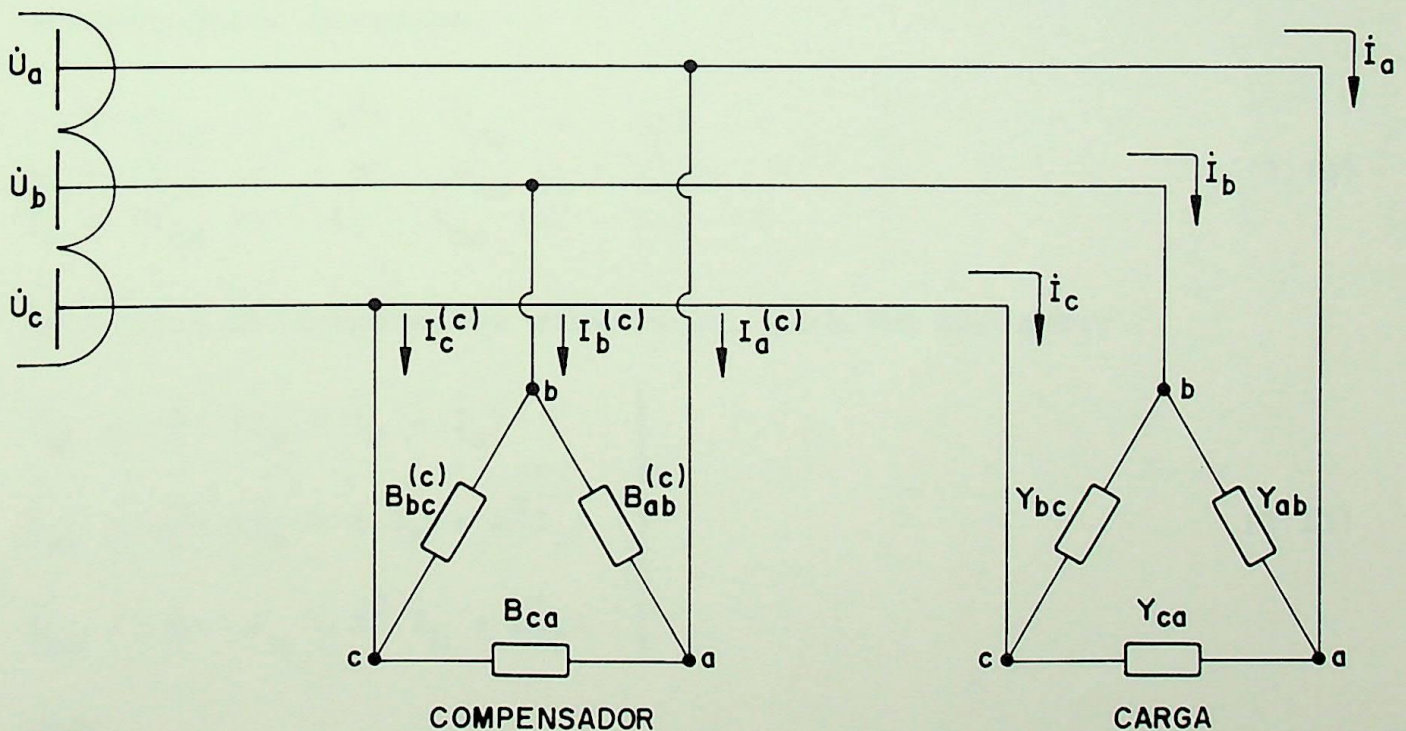


Figura 2.6 - Carga trifásica desbalanceada e compensador, alimentados por sistema elétrico equilibrado

onde:

$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ - fasores das correntes de linha da carga;

$\dot{I}_a^{(c)}, \dot{I}_b^{(c)}, \dot{I}_c^{(c)}$ - fasores das correntes de linha do compensador;

Y_{ab}, Y_{bc}, Y_{ca} - admitâncias da carga;

$B_{ab}^{(c)}, B_{bc}^{(c)}, B_{ca}^{(c)}$ - susceptâncias compensadoras da carga, introduzidas entre as fases.

$$\left. \begin{array}{l} \dot{U}_a = U \\ \dot{U}_b = a^2 U \\ \dot{U}_c = a U \end{array} \right\} \text{ tensões da rede de suprimento de energia}$$

(define-se $a = 1.e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ → operador complexo)

Na figura anterior, tem-se para as correntes alimentadoras da carga:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_a = [Y_{ab}(1 - a^2) - Y_{ca}(a - 1)] \cdot U \\ \dot{I}_b = [Y_{bc}(a^2 - a) - Y_{ab}(1 - a^2)] \cdot U \\ \dot{I}_c = [Y_{ca}(a - 1) - Y_{bc}(a^2 - a)] \cdot U \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

Da teoria de componentes simétricos, pode-se escrever:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a \cdot \dot{I}_b + a^2 \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a^2 \cdot \dot{I}_b + a \dot{I}_c) \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

onde:

$\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2}$ são os fasores das correntes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Substituindo os valores de \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c , das equações (2.10) nas equações (2.11), vem:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \dot{I}_{a1} &= (Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca}) \cdot \dot{U} \\ \dot{I}_{a2} &= - (a^2 Y_{ab} + Y_{bc} + aY_{ca}) \cdot \dot{U} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

A partir destes componentes de sequência da corrente de carga, pode-se estabelecer os objetivos da compensação. Ou seja, eliminar a componente de sequência negativa e reduzir (ou, até mesmo cancelar) a parte reativa da componente de sequência positiva. Isto corresponderia, respectivamente, ao balanceamento e a correção do fator de potência da carga. Essas necessidades podem ser fornecidas pelo circuito compensador apresentado na figura 2.6. As suas correntes de sequência podem ser obtidas de maneira análoga àquelas da equação (2.12). Assim:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a0}^{(c)} &= 0 \\ \dot{I}_{a1}^{(c)} &= j \left[B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + B_{ca}^{(c)} \right] \cdot \dot{U} \\ \dot{I}_{a2}^{(c)} &= -j \left[a^2 B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + aB_{ca}^{(c)} \right] \cdot \dot{U} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

As condições para compensação total da carga podem ser estabelecidas como nas equações a seguir.

$$\text{CONDIÇÃO 1: } \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a2}^{(c)} = 0 \quad (2.14)$$

$$\text{CONDIÇÃO 2: } I_m \left\{ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a1}^{(c)} \right\} = 0 \quad (2.15)$$

Devido a equação (2.14) ser composta, necessariamente, de partes real e imaginária, ela dá origem a duas novas condições. Isso já não acontece com a equação (2.15), formada apenas pela parte imaginária. Assim pode-se escrever:

$$\text{CONDIÇÃO 1.1: } R_e I_{a2} + R_e I_{a2}^{(c)} = 0 \quad (2.13)$$

$$\text{CONDIÇÃO 1.2: } I_m I_{a2} + I_m I_{a2}^{(c)} = 0 \quad (2.14)$$

Manipulando-se as equações (2.13), (2.16) e (2.17), obtem-se para as susceptâncias que terão a finalidade de compensar a carga, os valores seguintes.

$$\left. \begin{aligned} B_{ab}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \{ \dot{I}_{a1} \} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \{ \dot{I}_{a2} \} + R_e \{ \dot{I}_{a2} \} \\ B_{bc}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \{ \dot{I}_{a1} \} + \frac{2}{\sqrt{3}} I_m \{ \dot{I}_{a2} \} \\ B_{ca}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \{ \dot{I}_{a1} \} - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \{ \dot{I}_{a2} \} - R_e \{ \dot{I}_{a2} \} \end{aligned} \right\} (2.18)$$

Através desse conjunto de equações, pode-se observar que as contribuições das correntes de sequência positiva e negativa são independentes. Com isso, o sistema de compensação pode ser considerado em termos de 2 circuitos independentes. Um circuito equilibrado, supre a compensação de reativos junto a carga, enquanto o outro se responsabiliza pela parcela correspondente a corrente de sequência negativa. De (2.18), observa-se a mesma proporcionalidade de contribuição da corrente de sequência positiva na formação das impedâncias que, vista da rede, efetuarão a compensação, indicando a natureza equilibrada do circuito compensador de reativos. A figura 2.7 ilustra os 2 (dois) circuitos responsáveis pela compensação da carga, admitindo-se que a fonte é perfeitamente equilibrada.

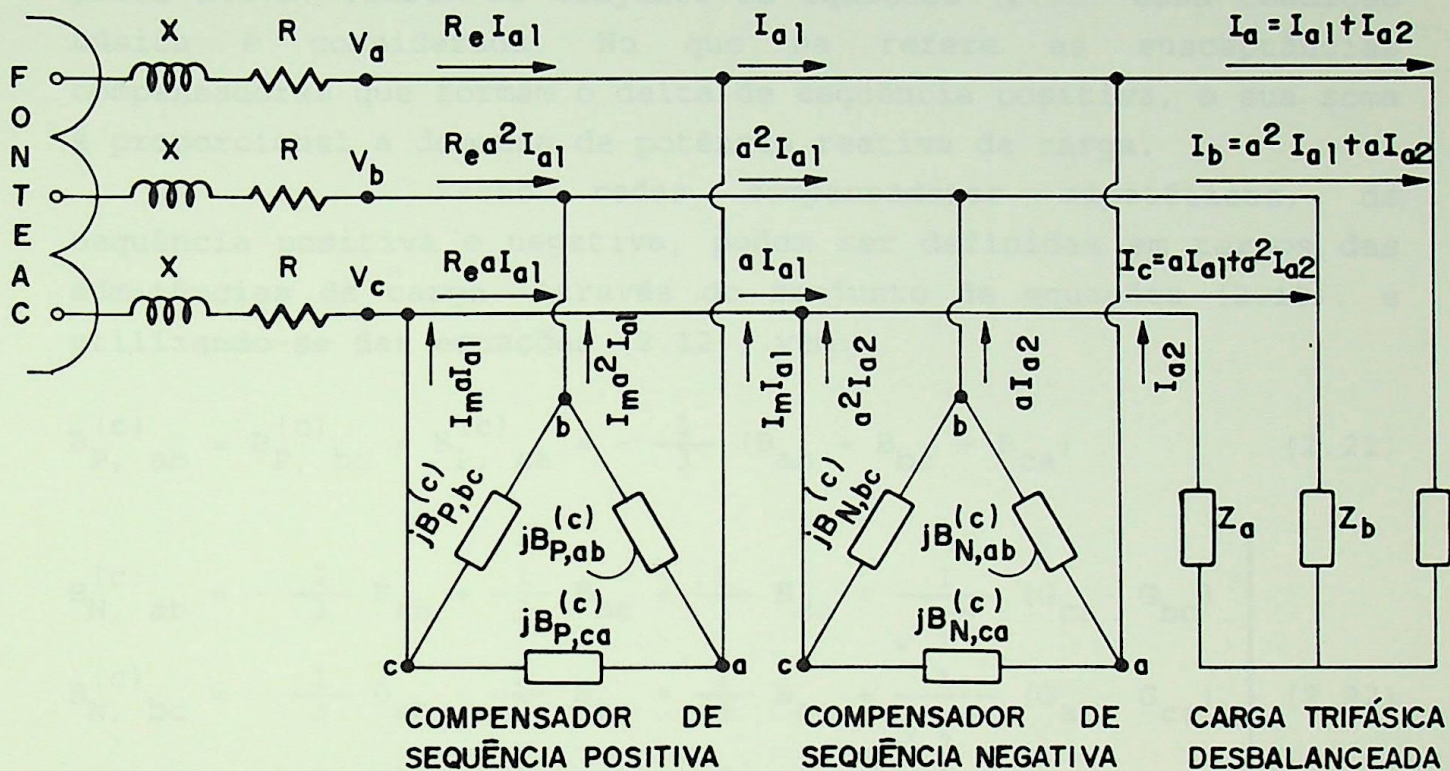


Figura 2.7 - Fonte alimentando sistema que contém carga desbalanceada, e circuitos para a compensação das parcelas de sequência positiva e negativa da corrente.

Na figura anterior, tem-se as seguintes relações:

$$B_{N, ab}^{(c)} + B_{N, bc}^{(c)} + B_{N, ca}^{(c)} = 0 \tag{2.19}$$

$$B_{P, ab}^{(c)} = B_{P, bc}^{(c)} = B_{P, ca}^{(c)} \tag{2.20}$$

A relação expressa na equação (2.19) traduz a condição das equações, em que I_{a1} é nulo somente se a soma das susceptâncias for zero. Pode-se observar que as susceptâncias resultantes das equações (2.8), do ítem anterior, também somam zero, no tocante as condutâncias compensadoras do desequilíbrio da parte ativa. Também no conjunto de equações (2.18) essa condição básica é considerada. No que se refere as susceptâncias compensadoras que formam o delta de sequência positiva, a sua soma é proporcional a demanda de potência reativa da carga.

Essas redes compensadoras hipotéticas, de sequência positiva e negativa, podem ser definidas em termos das admitâncias de carga. Através do conjunto de equações (2.18), e utilizando-se das equações (2.12), vem:

$$B_{P, ab}^{(c)} = B_{P, bc}^{(c)} = B_{P, ca}^{(c)} = -\frac{1}{3} (B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) \quad (2.21)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{N, ab}^{(c)} &= -\frac{2}{3} B_{ab} + \frac{1}{3} B_{bc} + \frac{1}{3} B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{ca} - G_{bc}) \\ B_{N, bc}^{(c)} &= \frac{1}{3} B_{ab} - \frac{2}{3} B_{bc} + \frac{1}{3} B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{ab} - G_{ca}) \\ B_{N, ca}^{(c)} &= \frac{1}{3} B_{ab} + \frac{1}{3} B_{bc} - \frac{2}{3} B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{bc} - G_{ab}) \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

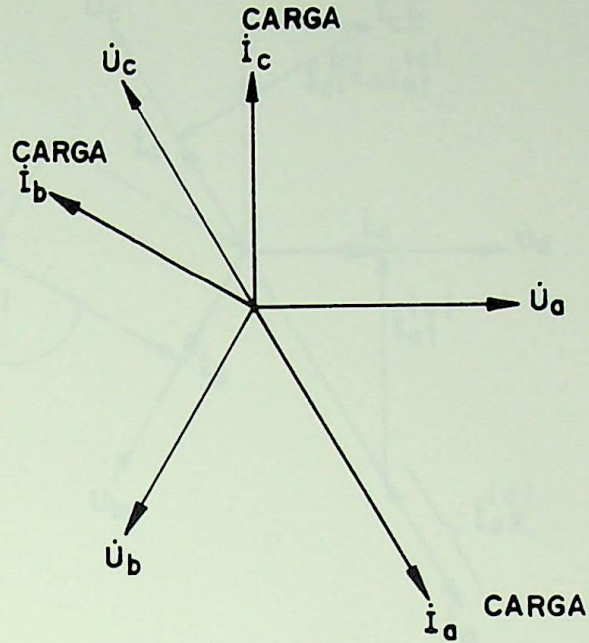
onde:

P - componente de sequência positiva;

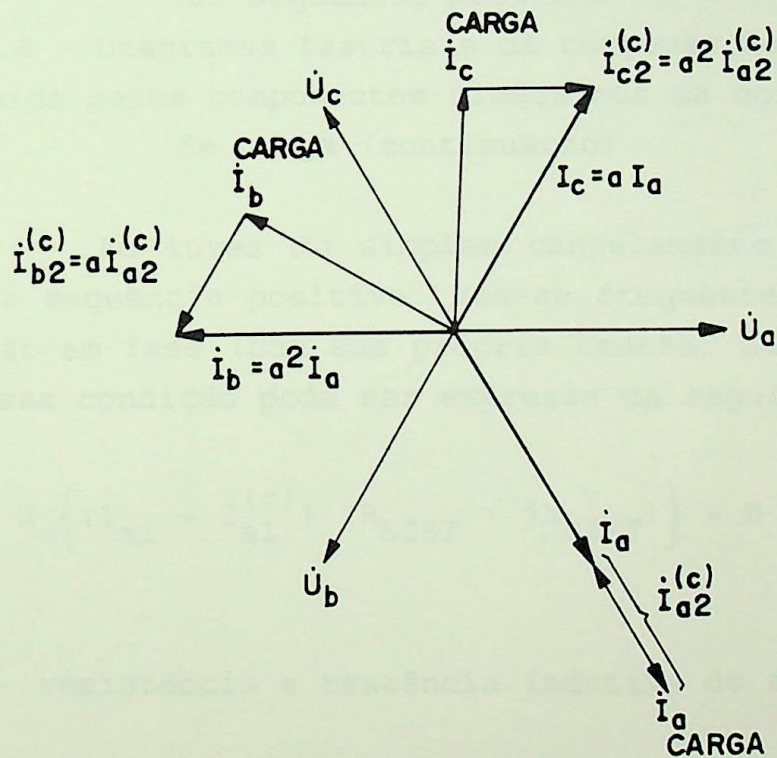
N - componente de sequência negativa;

Percebe-se que a soma das equações (2.21) e (2.22) conduzem ao mesmo valor que aquele obtido nas equações (2.18).

O diagrama fasorial da figura 2.8 ilustra a compensação da carga em termos das correntes de sequência positiva e negativa.

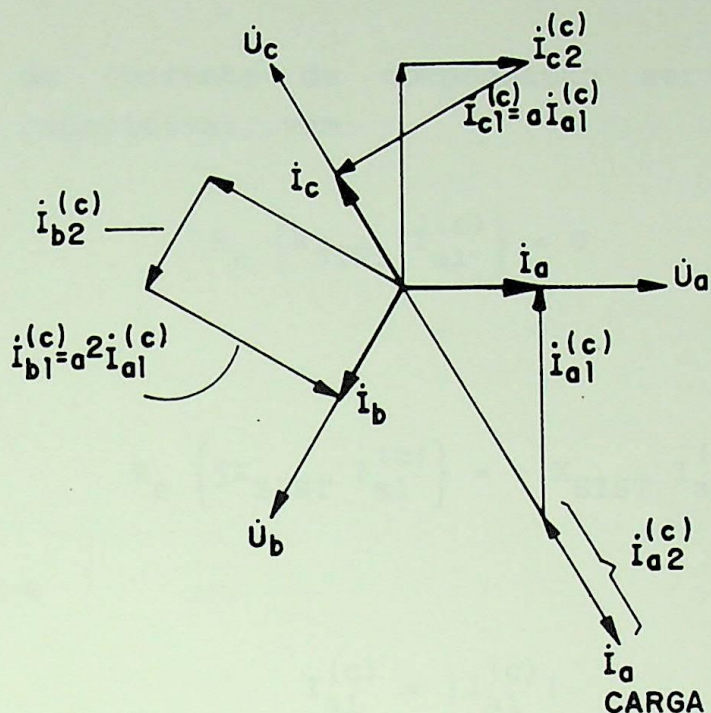


a) Diagrama fasorial da corrente absorvida pela carga



b) Balanceamento pelas correntes compensadoras de sequência negativa

Figura 2.8 - Diagramas fasoriais da compensação da carga definida pelos componentes simétricos da corrente de carga (continua página seguinte)



c) Eliminação do componente reativo através das correntes de sequência positiva

Figura 2.8 - Diagramas fasoriais da compensação da carga definida pelos componentes simétricos da corrente de carga (continuação)

Ao invés do simples cancelamento do componente da corrente de sequência positiva, usa-se frequentemente anular a queda de tensão em fase (com sua própria tensão) na impedância de suprimento. Essa condição pode ser expressa da seguinte forma:

$$R_e \left\{ (\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a1}^{(c)}) (R_{SIST} + jX_{SIST}) \right\} = 0 \quad (2.23)$$

onde:

R_{SIST}, X_{SIST} - resistência e reatância indutiva do sistema.

Desenvolvendo a equação (2.23), vem:

$$R_e \left\{ R_{SIST} \dot{I}_{a1} + R_{SIST} \dot{I}_{a1}^{(c)} + jX_{SIST} \dot{I}_{a1} + jX_{SIST} \dot{I}_{a1}^{(c)} \right\} = 0$$

Em virtude da corrente de compensação ser do tipo reativa (indutiva ou capacitiva), vem:

$$R_e \left\{ R_{SIST} \dot{I}_{a1}^{(c)} \right\} = 0$$

Como também,

$$R_e \left\{ jX_{SIST} \dot{I}_{a1}^{(c)} \right\} = - X_{SIST} \dot{I}_{a1}^{(c)}$$

Sabendo-se que

$$I_{a1}^{(c)} = |I_{a1}^{(c)}|.$$

Assim pode-se reescrever a equação (2.23) incluindo as igualdades anteriores. Ou seja,

$$\frac{R_{SIST}}{X_{SIST}} R_e \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} - I_m \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} - \dot{I}_{a1}^{(c)} = 0 \quad (2.24)$$

Essa nova situação, deve ser considerada no conjunto de equações (2.18). Assim, com o uso das equações (2.13), (2.16), (2.17) e (2.24), vem:

$$\left. \begin{aligned} B_{ab}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_{SIST}}{X_{SIST}} R_e \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} - I_m \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} \right] - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \left\{ \dot{I}_{a2} \right\} + R_e \left\{ \dot{I}_{a2} \right\} \\ B_{bc}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_{SIST}}{X_{SIST}} R_e \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} - I_m \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} I_m \left\{ \dot{I}_{a2} \right\} \\ B_{ca}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{R_{SIST}}{X_{SIST}} R_e \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} - I_m \left\{ \dot{I}_{a1} \right\} \right] - \frac{1}{\sqrt{3}} I_m \left\{ \dot{I}_{a2} \right\} - R_e \left\{ \dot{I}_{a2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Na prática, o sistema de compensação é feito com um conjunto de capacitores e indutores controláveis dinamicamente. Esses componentes devem efetuar tanto a compensação do desequilíbrio da carga, quanto a redução do fluxo de potência reativa do sistema.

Nos itens que se seguem, são apresentados os principais equipamentos utilizados na prática, e que são capazes de realizar a tarefa da compensação abordada.

2.3. PRINCIPAIS COMPENSADORES ESTÁTICOS SHUNT UTILIZADOS NA CORREÇÃO DE GRANDES CARGAS INDUSTRIAIS

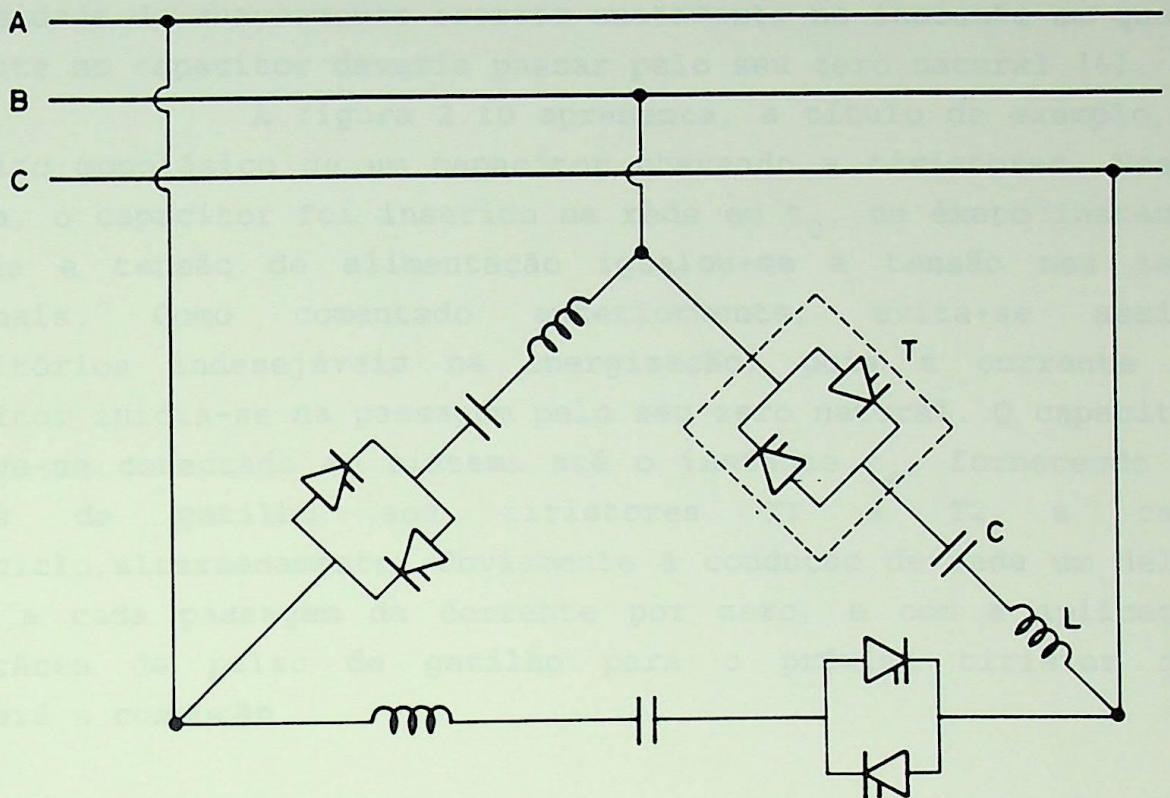
Apesar de existirem diversas formas de compensadores estáticos shunt, serão analisados apenas os capacitores chaveados e tiristores (CCT), e os reatores controlados a tiristores (RCT) com capacitores fixos, por serem os mais frequentemente utilizados na correção do fator de potência e desequilíbrios de grandes cargas industriais.

2.3.1 - CAPACITORES CHAVEADOS A TIRISTORES (CCT)

Os capacitores chaveados a tiristores atuam de modo simples e atendem as medidas de elevação do fator de potência, e se bem dimensionados evitam problemas durante sua operação junto ao sistema elétrico industrial. A conexão típica destes tipos de equipamento está apresentada na figura 2.9.

A conexão apresentada na figura 2.9 oferece inúmeras vantagens em relação aos bancos de capacitores chaveados mecanicamente. As manobras efetuadas nos capacitores, ocorrem no caso do CCT, livre de transitórios, pois o instante do chaveamento nesses casos acontecem no momento adequado. No que se refere a compensação do desbalanço, isto pode ser realizado por intermédio da conexão dos capacitores apropriados, a partir de disparos nos tiristores convenientes. Naturalmente, também pode-se citar como grande vantagem, a velocidade de correção do fator de potência efetuado pelo CCT, bem como praticamente ausência de perdas e

manutenção reduzida.

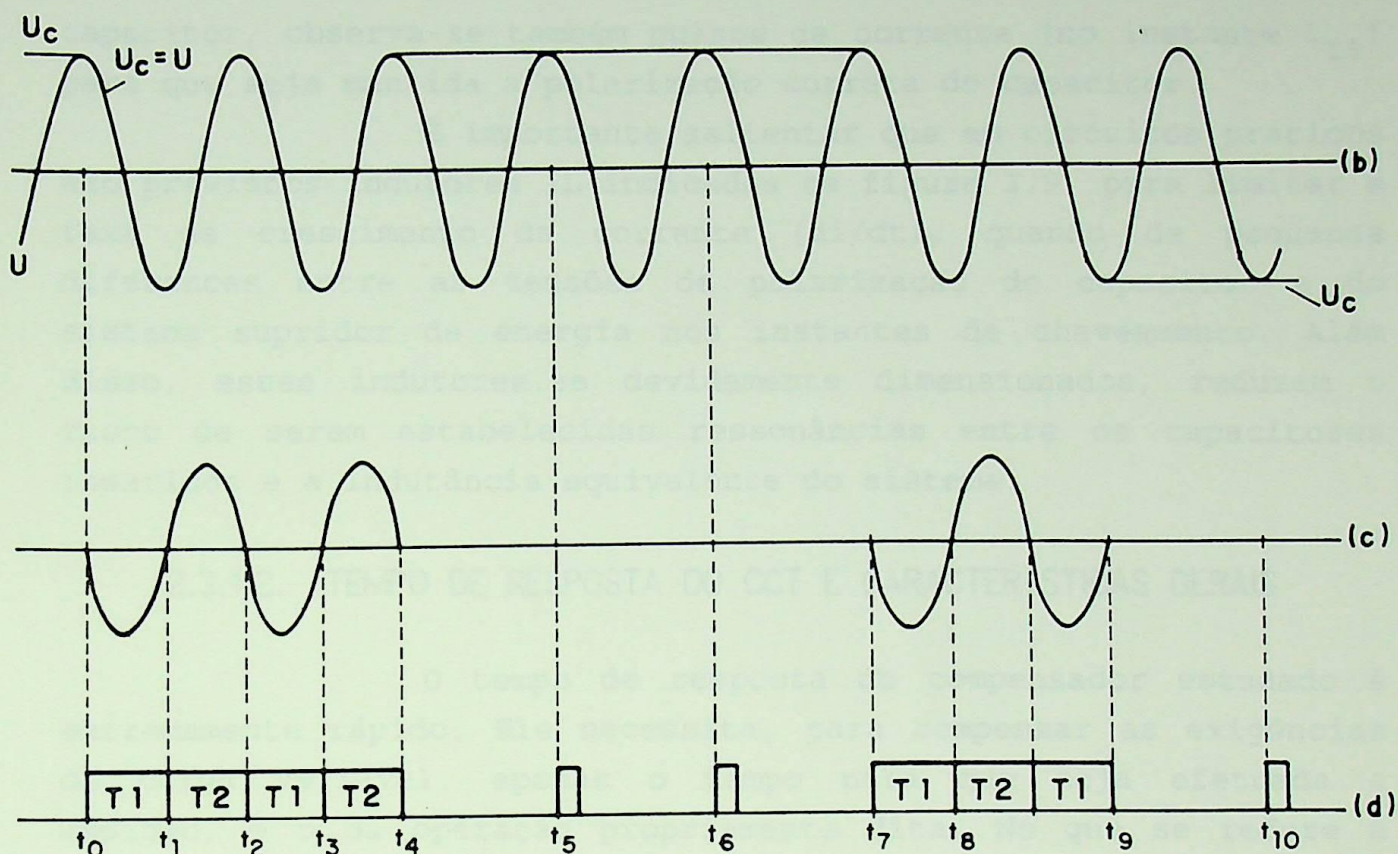


T - TIRISTORES EM ANTIPARALELO
C - CAPACITOR
L - REATOR

Figura 2.9 - Conexão trifásica típica de capacitores chaveados a tiristores

2.3.1.1 - PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

Os capacitores são componentes do sistema elétrico que exigem demasiadamente das chaves que executam a sua manobra. Isso ocorre em virtude dos transitórios provocados pelas suas próprias características elétricas. Eles se comportam como um curto-circuito frente as ondas de tensão que lhe são aplicadas. Para dificultar ainda mais a operação de chaveamento, os capacitores têm uma capacidade inerente de armazenamento de energia em forma de tensão, que faz com que esse componente já carregado, ao ser energizado de modo aleatório, provoca o aparecimento de transitórios de corrente bastante elevado.



b) Tensões da rede e do capacitor

c) Corrente no capacitor

d) Pulsos de gatilho nos tiristores T1 e T2

Figura 2.10 - Operação do capacitor chaveado a tiristores (continuação)

Note que a partir do instante t_4 o capacitor permanece desconectado da rede até o instante t_7 . Durante esse tempo a tensão em seus terminais (U_c) acompanha a da rede (U). Em virtude dos resistores de descarga consumirem lentamente a energia armazenada no capacitor, ele deve receber pulsos de correntes de pequena duração, enviados pelo último tiristor que conduziu (T2, nesse intervalo). Isso pode ser observado em (d), na figura 2.10. Essa operação, conhecida na prática como "flash", mantém o capacitor carregado com o pico da tensão da rede. No instante t_9 houve uma repolarização do capacitor quando a corrente do tiristor T1 cessou sua condução, e não foi fornecido pulso de gatilhamento a T2. A partir desse instante, com uma nova desconexão do

capacitor, observa-se também pulsos de corrente (no instante t_{10}) para que seja mantida a polarização correta do capacitor.

É importante salientar que em circuitos práticos são previstos indutores (L indicados na figura 2.9) para limitar a taxa de crescimento da corrente (di/dt), quando de pequenas diferenças entre as tensões de polarização do capacitor e do sistema supridor de energia nos instantes de chaveamento. Além disso, esses indutores, se devidamente dimensionados, reduzem o risco de serem estabelecidas ressonâncias entre os capacitores inseridos e a indutância equivalente do sistema.

2.3.1.2. TEMPO DE RESPOSTA DO CCT E CARACTERÍSTICAS GERAIS

O tempo de resposta do compensador estudado é extremamente rápido. Ele necessita, para compensar as exigências da carga variável, apenas o tempo para que seja efetuada a medição, e o da operação propriamente dita. No que se refere à medição, apenas um ciclo da tensão AC é suficiente, para que o sinal da grandeza seja analisado. Também é utilizado, sem muitos comprometimentos com a precisão apenas meio ciclo da onda de 60 [Hz]. Quanto ao tempo demandado desde a medição até a operação do equipamento, este pode ser de até um ciclo, dependendo do instante em que a energia reativa adicional se faz necessária, já que para a mudança do estado operacional da chave tiristorizada, ela pode ser considerada instantânea. Para a desenergização apenas meio-ciclo é suficiente.

Para que a demanda de potência reativa seja acompanhada de perto pelo compensador, há a necessidade que a potência capacitiva necessária à compensação do consumo máximo de reativos, seja dividida em diversas unidades que farão a operação estudada em degraus. Essas unidades são escolhidas de tal forma que as variações da tensão no barramento do compensador sejam inferiores a 0,25%. Elas também são função do grau de desequilíbrio provocado pela carga. Aproximadamente pode-se estimá-las, para início de cálculos de projeto, através da seguinte expressão:

$$Q_{UC} = S_{CC} \cdot \frac{\Delta U}{U} \quad (2.26)$$

onde:

S_{CC} - potência de curto-circuito da rede em [MVA]

A figura 2.11 ilustra como o compensador estático acompanha as variações da carga no que se refere ao consumo de potência reativa.

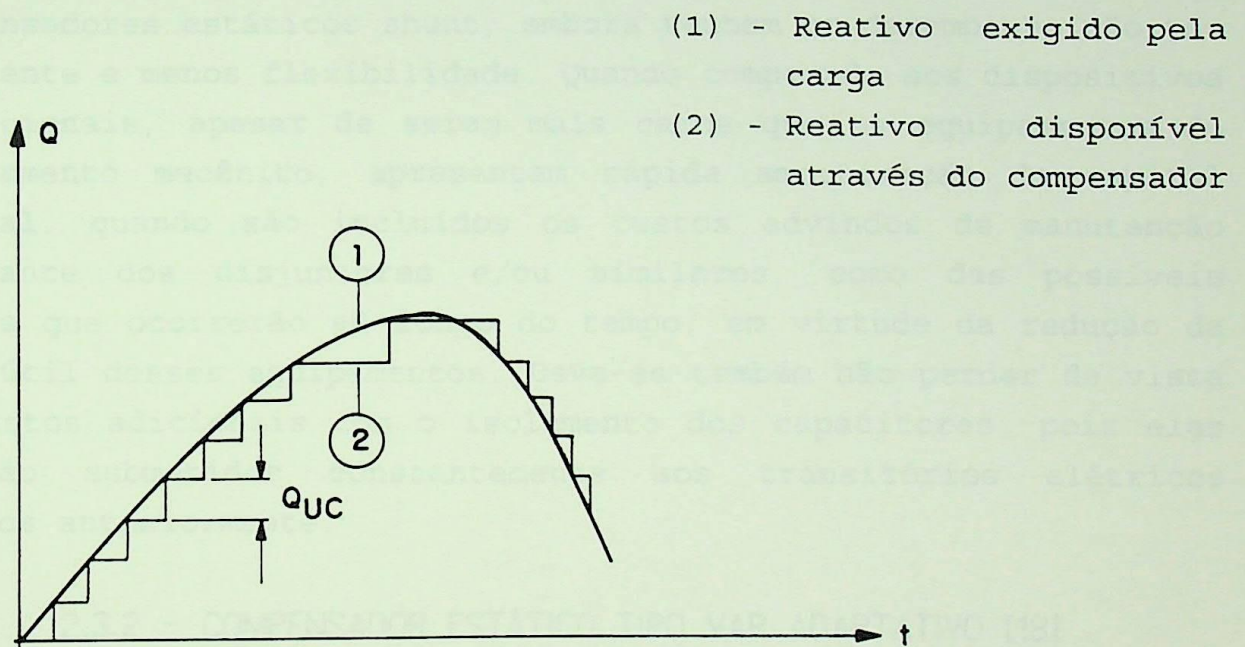


Figura 2.11 - Conexão de unidades capacitivas no sistema

A compensação em degraus (vide figura 2.11), característica desse tipo de equipamento, representa uma desvantagem em relação aos outros sistemas estáticos de compensação. Também o tempo de resposta, apesar de rápido em relação aos disjuntores, apresentam-se com relativa lentidão quando comparado a compensadores do tipo reator controlado a tiristores. Outros aspectos negativos são os possíveis efeitos de ressonância, e necessidade de proteção contra sobretensões. As principais vantagens do CCT, são:

- não há geração de harmônicos;
- facilidade na ampliação do banco;
- compensação pode ser realizada por fase;
- pequenas perdas e,
- as falhas, produzem efeitos limitados, pois a parte defeituosa sai de operação, enquanto o restante do banco continua operando normalmente.

No tocante aos custos desse equipamento, ele se apresenta como o menor, quando comparado aos outros tipos de compensadores estáticos shunt, embora tenham um desempenho não tão eficiente e menos flexibilidade. Quando comparado aos dispositivos tradicionais, apesar de serem mais caros que os equipamentos de chaveamento mecânico, apresentam rápida amortização do capital inicial, quando são incluídos os custos advindos de manutenção constante dos disjuntores e/ou similares, como das possíveis trocas que ocorrerão ao longo do tempo, em virtude da redução da vida útil desses equipamentos. Deve-se também não perder de vista os custos adicionais com o isolamento dos capacitores, pois eles estarão submetidos constantemente aos transitórios elétricos citados anteriormente.

2.3.2 - COMPENSADOR ESTÁTICO TIPO VAR ADAPTATIVO [18]

2.3.2.1 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

O compensador estático tipo VAR adaptativo (AVC), é um equipamento composto por bancos de capacitores chaveados por tiristores e diodos que compensam a demanda de reativos exigida pela carga. O tempo necessário para esta compensação é de um ciclo, sendo portanto adequado as solicitações de potência reativa de cargas não-lineares.

Através do chaveamento dos semicondutores controlados em instantes pré-determinados, ocorre a inserção das unidades capacitivas no sistema elétrico sem a ocorrência de transitórios ou geração de harmônicos pelo equipamento

compensador.

O AVC pode também ser empregado como um controlador de tensão adaptativo com a mesma performance do modo de controle de potência reativa.

A potência reativa por fase suprida pelo AVC pode ser dividida em vários estágios usando incrementos binários. A equação a seguir ilustra os valores possíveis de potência reativa por fase para este tipo de compensador.

$$Q_1 * (2^1 + 2^2 + \dots + 2^n) = \text{potência reativa total por fase do AVC}$$

onde:

Q_1 - resolução do AVC que corresponde a metade do menor grupo de capacitores dos estágios (metade da potência reativa do estágio mínimo);

n - número de estágios utilizado pelo AVC.

A figura 2.12 representa um diagrama do AVC, com "n" estágios.

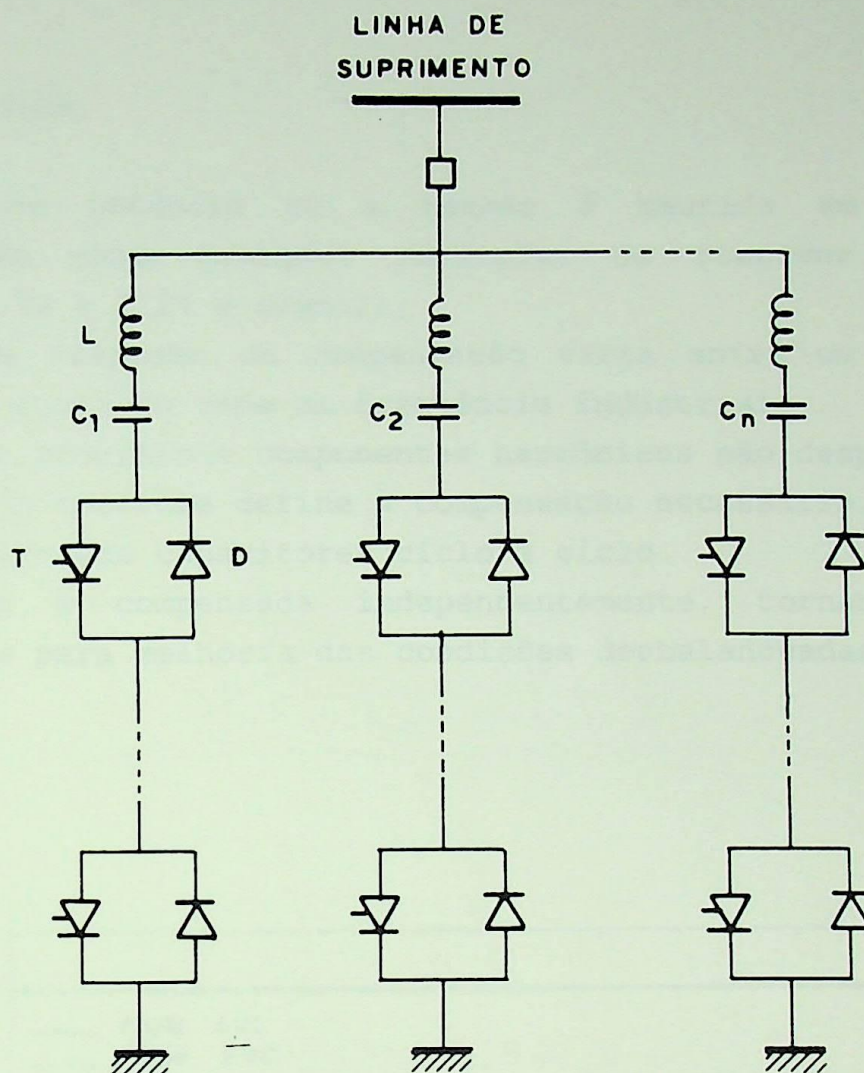


Figura 2.12 - Diagrama unifilar do circuito de potência do AVC.

Onde:

L - indutores de proteção devido a di/dt

$C_1, C_2 \dots C_n$ - bancos de capacitores do primeiro, segundo e n-ésimo estágio;

T - tiristor

D - diodo

Como indicado na figura 2.12, cada estágio de capacitores é controlado por uma válvula de estado sólido, o qual é composta pela associação série de um conjunto de um tiristor e um diodo conectados em antiparalelo.

As principais funções e características do AVC

são as seguintes:

- O fator de potência ou a tensão é mantida em um valor especificado para qualquer variações de reativos da carga (figuras 2.13 e 2.14 a seguir);
- O tempo de resposta da compensação varia entre um quarto de ciclo e um ciclo de rede na frequência industrial;
- Transitório elétrico e componentes harmônicos são desprezíveis;
- O sistema de controle define a compensação necessária, e provoca o chaveamento dos capacitores ciclo a ciclo.
- Cada fase é compensada independentemente, tornando o AVC conveniente para melhoria das condições desbalanceadas;

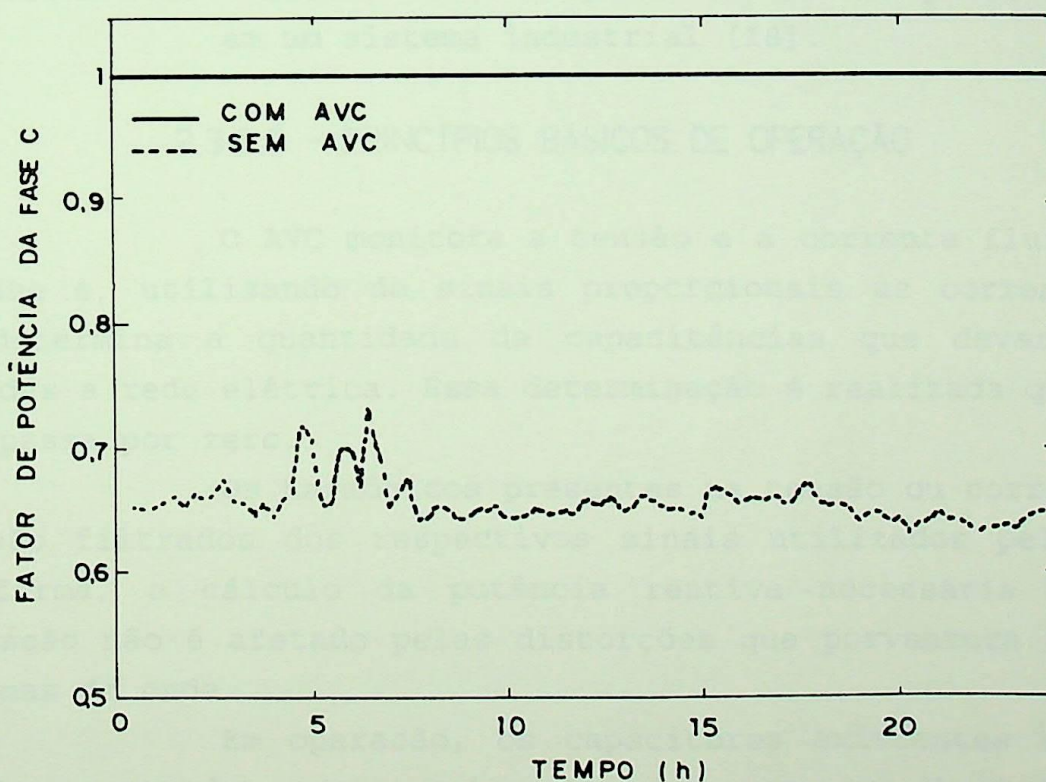


FIGURA 2.13 - Resultado de campo para o AVC na função de correção do fator de potência para um valor desejado (1,0 neste caso), para cada fase independentemente [18].

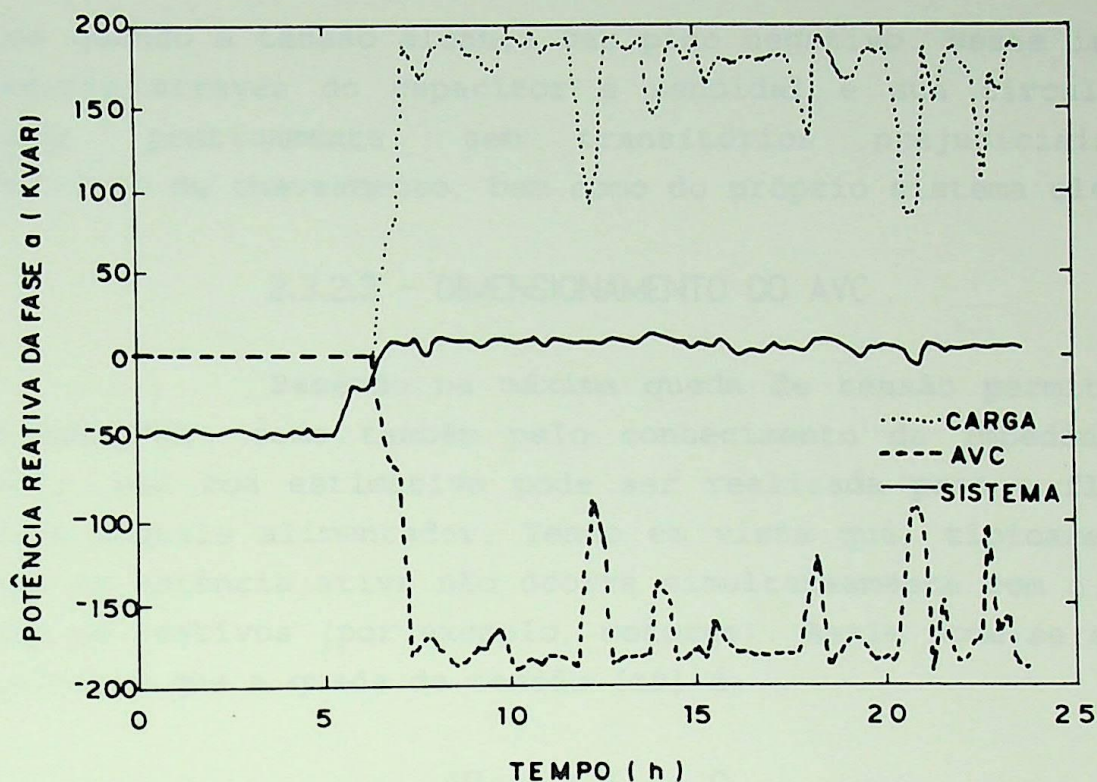


FIGURA 2.14 - Resultado de campo de um AVC em operação em um sistema industrial [18].

2.3.2.2 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OPERAÇÃO

O AVC monitora a tensão e a corrente fluindo em cada fase e, utilizando de sinais proporcionais as correntes de fase, determina a quantidade de capacitâncias que deverão ser conectadas a rede elétrica. Essa determinação é realizada quando a tensão passa por zero.

Os harmônicos presentes na tensão ou corrente de linha são filtrados dos respectivos sinais utilizados pelo AVC. Dessa forma, o cálculo da potência reativa necessária para a compensação não é afetado pelas distorções que porventura existam nas formas de onda.

Em operação, os capacitores existentes em cada fase são carregados com o valor do pico negativo da tensão de suprimento, permanecendo dessa maneira até que um sinal de disparo seja aplicado as chaves tiristorizadas. Os tempos dos sinais de gatilho são ajustados para que os tiristores entrem em condução

somente quando a tensão alcança seu pico negativo. Neste instante a corrente através do capacitor é senoidal e sua circulação é iniciada, praticamente, sem transitórios prejudiciais aos dispositivos de chaveamento, bem como do próprio sistema elétrico.

2.3.2.3 - DIMENSIONAMENTO DO AVC

Baseado na máxima queda de tensão permitida em um alimentador, como também pelo conhecimento da impedância do circuito, uma boa estimativa pode ser realizada para o fluxo de potência naquele alimentador. Tendo em vista que, tipicamente, a demanda de potência ativa não ocorre simultaneamente com a máxima demanda de reativos (por exemplo, motores). Assim pode-se estimar inicialmente que a queda de tensão [19] é:

$$\Delta U_{f_{\max}} = X_{TH} \cdot Q \quad (2.27)$$

Então:

$$Q = \frac{\Delta U_{f_{\max}}}{X_{TH}} \quad (2.28)$$

onde:

- Q - máximo fluxo de potência reativa que produzirá uma determinada queda de tensão ($\Delta U_{f_{\max}}$), [pu];
- X_{TH} - reatância indutiva equivalente do circuito, (equivalente de THEVENIN) em pu;
- $\Delta U_{f_{\max}}$ - queda de tensão máxima permitida.

Dessa maneira, o "Q" calculado corresponderá a potência máxima necessária ao AVC. A partir disso, pela multiplicação de "Q" por 2 (estágio mínimo), e o resultado por 7 (AVC de três estágios), ou 15 (AVC de 4 estágios), obtém-se a potência por fase do equipamento. Naturalmente, a potência total é três vezes maior que a monofásica. Exemplo:

- Considere um sistema com as seguintes características:

$$U_N = 4,16 \text{ [kV]}$$

$$P_{\text{carga}} = 2,0 \text{ [MW]}$$

$$Q_{\text{carga}} = 2,0 \text{ [MVar]}$$

$$X_{\text{TH}} = j 1,0 \text{ [\Omega]}$$

$$R_{\text{TH}} = 0,5 \text{ [\Omega]}$$

Adotando-se a tensão nominal do sistema e 10 MVA como valores base, obtém-se os seguintes valores por unidade:

$$\bar{P} = 0,2 \text{ [pu]}$$

$$\bar{Q} = 0,2 \text{ [pu]}$$

$$\bar{X}_{\text{TH}} = 0,578 \text{ [pu]}$$

$$\bar{R}_{\text{TH}} = 0,289 \text{ [pu]}$$

Logo, a partir de (2.28) e considerando que a máxima queda de tensão não deverá exceder 1%, tem-se que a máxima resolução do AVC deverá ser de:

$$\bar{Q}_{\text{max}} = \frac{0,01}{0,578} = 0,0173 \text{ [pu]}$$

ou ainda,

$$Q_{\text{max}} = 0,0173 \times 10 \text{ MVA} = 173 \text{ KVar}$$

Adotando-se tipicamente neste caso 170 KVar como sendo a resolução máxima do AVC.

Visto que a potência reativa da carga equivale a 2 [MVar], um valor em torno de 2100 [KVar] poderia ser selecionada para o AVC a qual poderia corrigir o fator de potência em 1. A resolução de 50 KVar, nesse caso, apresenta-se como um valor adequado para um AVC de 3 estágios. A queda de tensão máxima resultante seria de:

$$\bar{\Delta U}_{\text{rmax}} = 0,578 \cdot \frac{50}{10000} = 0,00289$$

Ou ainda,

$$\Delta U_{r\max} = 0,29\%$$

Que é um valor bem inferior ao limite de 1% fixado.

2.3.2.4 - PROCESSO DE COMPENSAÇÃO EFETUADO PELO AVC ([18], [19])

Os controles deste tipo de compensador, segundo o fabricante, atua de maneira a conectar as diferentes combinações de estágios sempre que a demanda da carga encontra-se entre a metade da potência do estágio mínimo, e a potência real de saída daquele estágio particular.

A figura 2.15 mostra o diagrama unifilar para um AVC de 2100 [KVar].

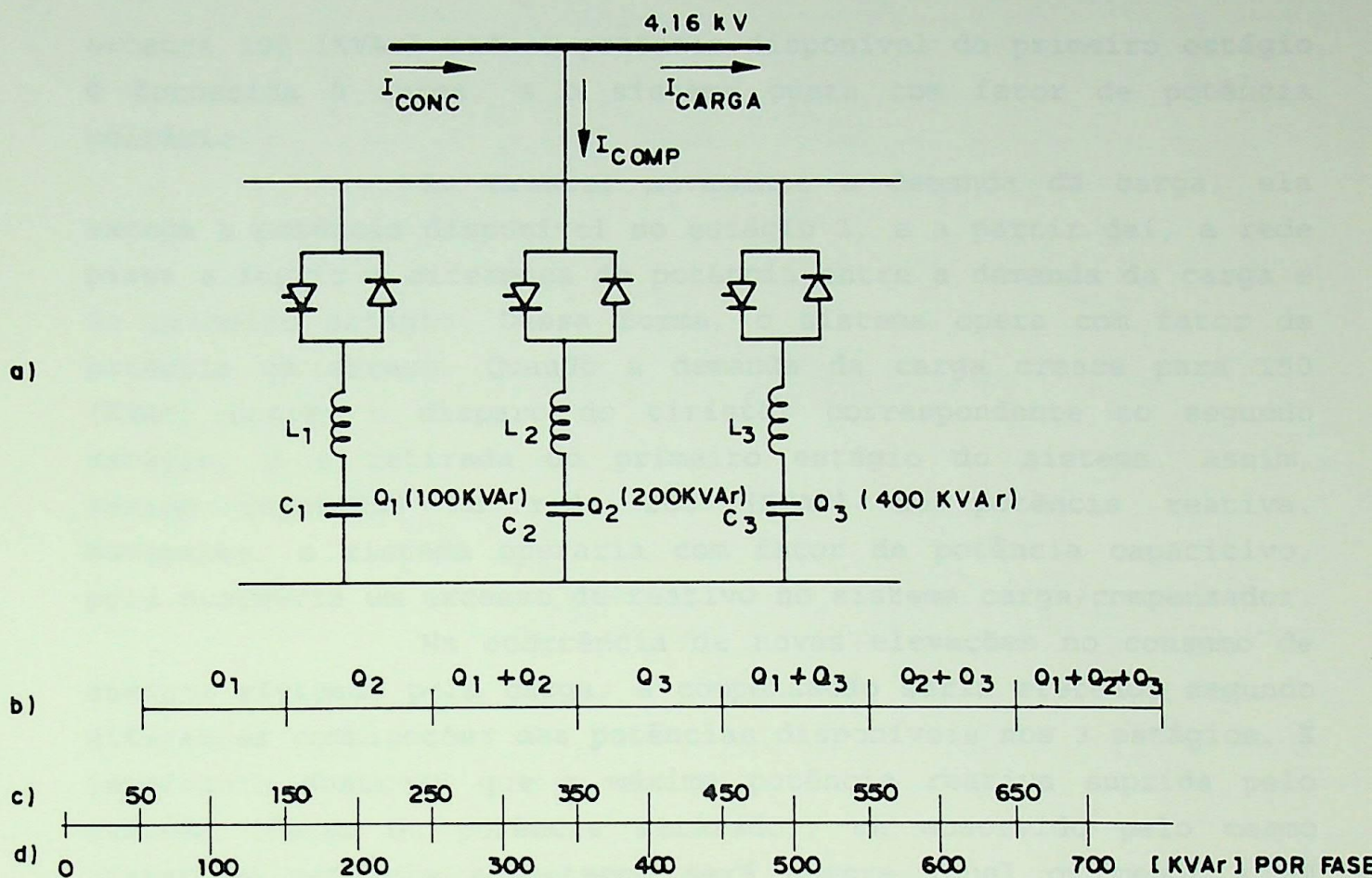


Figura 2.15 - AVC de 2100 [KVAR], 4,16 [KV], 3 estágios e mecanismo de atuação da compensação.

(a) Diagrama unifilar

(b) Entrada dos estágios no sistema elétrico

(c) Potência reativa consumida pela carga

(d) Potência reativa fornecida pelo AVC

Na figura 2.15 observa-se que quando a demanda solicitada pela carga alcança 50 [KVAR] (metade da potência de saída do primeiro estágio - 100 [KVAR]), o estágio 1 é inserido ao sistema, proporcionando 100 [KVAR] à rede. Assim sendo, a carga absorverá os 50 [KVAR] exigidos, enquanto restarão outros 50 [KVAR] para serem injetados no sistema de suprimento. Como a demanda da carga cresce, esta absorverá mais reativos, correspondendo a uma menor injeção no sistema. Salienta-se que, neste instante, a carga se apresenta para a rede com fator de potência adiantado. Naturalmente, quando o consumo da carga

alcança 100 [KVA_r] toda a potência disponível do primeiro estágio é fornecida à carga, e o sistema opera com fator de potência unitário.

Ao crescer novamente a demanda da carga, ela excede a potência disponível no estágio 1, e a partir daí, a rede passa a suprir a diferença de potência entre a demanda da carga e do primeiro estágio. Dessa forma, o sistema opera com fator de potência em atraso. Quando a demanda da carga cresce para 150 [KVA_r] ocorre o disparo do tiristor correspondente ao segundo estágio, e a retirada do primeiro estágio do sistema. Assim, seriam injetados na rede 200 [KVA_r] de potência reativa. Novamente, o sistema operaria com fator de potência capacitivo, pois ocorreria um excesso de reativo no sistema carga/compensador.

Na ocorrência de novas elevações no consumo de energia efetuado pela carga, a compensação seria efetuada segundo diferentes combinações das potências disponíveis nos 3 estágios. É importante observar que a máxima potência reativa suprida pelo sistema (fator de potência atrasado), ou absorvido pelo mesmo (fator de potência adiantado) será sempre igual ou menor a 50 [KVA_r]. Isto é, metade da capacidade do estágio mínimo. Como comentado anteriormente, esta última característica é denominada resolução do AVC.

A título de exemplo, é apresentado na figura 2.16, oscilogramas do consumo da carga, da potência de saída do AVC, bem como do fluxo de potência no alimentador, para um equipamento de 750 [KVA_r], 480 [V], 3 estágios.

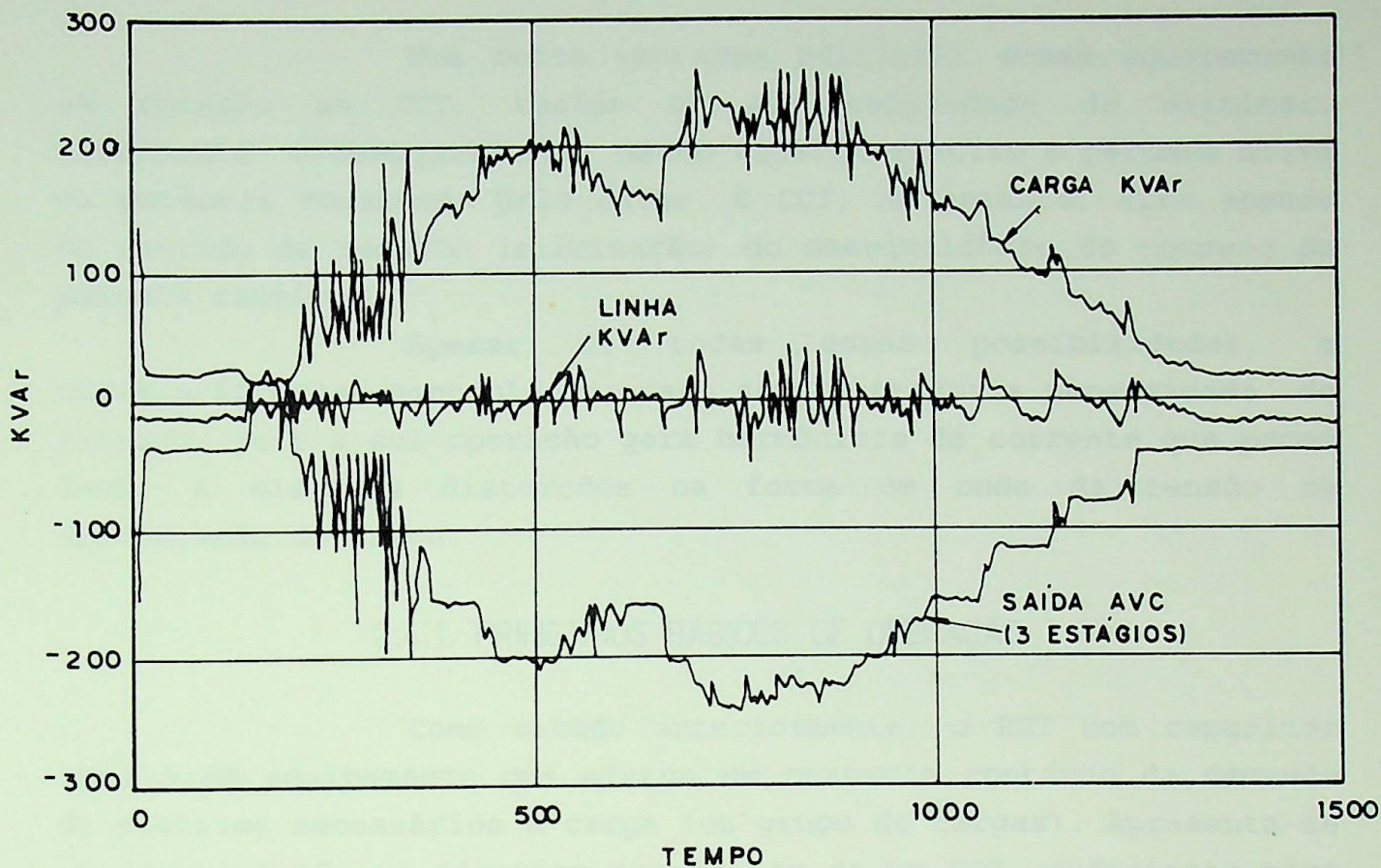


Figura 2.16 - Performance de um AVC de 480 [V], 750 [KVAR], 3 estágios, na compensação de carga indutiva [18].

2.4 - REATOR CONTROLADO A TIRISTORES COM CAPACITORES FIXOS

O reator controlado a tiristores (RCT) com capacitor fixo, é outro tipo de controlador de reativos estático bastante difundido. Diferente do CCT, esse equipamento exerce o controle da demanda de potência reativa de maneira contínua e com tempo de resposta mais rápido.

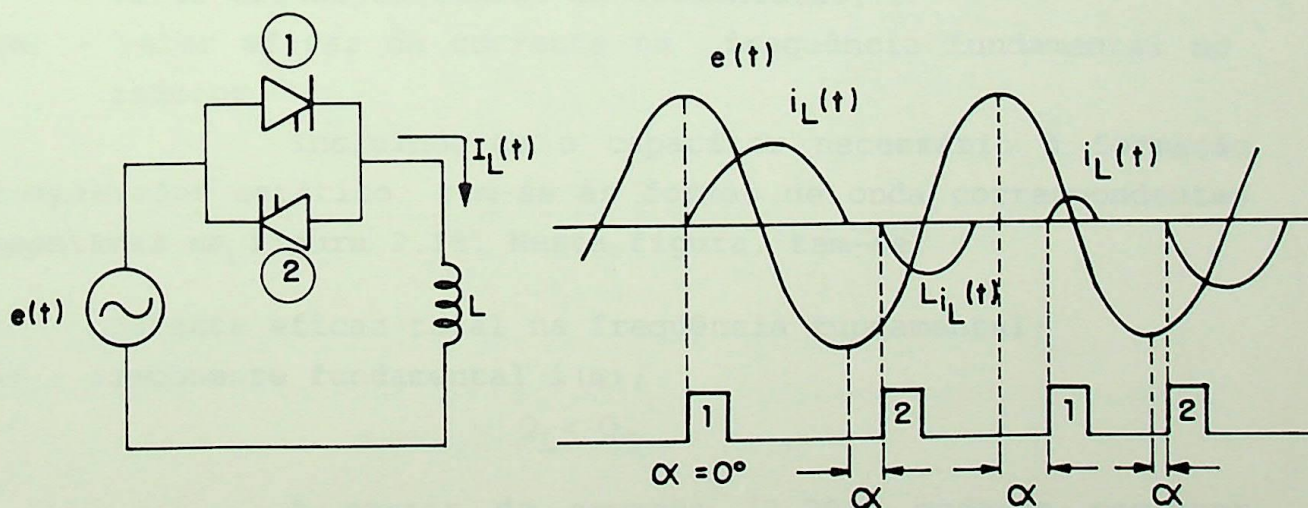
Assim, o RCT com capacitores fixos (ou chaveados a disjuntores) possui a habilidade natural em poder variar o ângulo de disparo dos tiristores de maneira contínua, sem a ocorrência de transitórios no chaveamento dos reatores. É importante mencionar também que os indutores chaveados pelos tiristores oferecem proteção inerente contra correntes de falta, bem como limitando a taxa de crescimento da corrente, tornando-os uma proteção natural dos semicondutores.

Uma outra vantagem adicional desse equipamento em relação ao CCT, reside na sua capacidade de eliminar, totalmente o desequilíbrio, mesmo aquele relativo a parcela ativa da potência consumida pela carga. O CCT, no entanto, atua apenas no sentido de redução (eliminação) do desequilíbrio do consumo da parcela reativa.

Apesar de todas essas possibilidades, a utilização desse controlador quase sempre traduz a necessidade de filtros, pois a sua operação gera harmônicos de corrente que podem levar a elevadas distorções na forma de onda da tensão de alimentação da carga.

2.4.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE OPERAÇÃO

Como citado anteriormente, o RCT com capacitor fixo é um equipamento que efetua um controle contínuo da demanda de reativos necessários à carga (ou grupo de cargas). Apresenta-se na figura 2.17, um circuito monofásico de um RCT, suficiente para o entendimento dos princípios básicos de operação.



a) Circuito monofásico simplificado de RCT

b) Variação do ângulo de disparo em RCT

Figura 2.17 - Chaveamento de RCT

Observa-se pela figura anterior, que o instante em que os semicondutores passam a ter a possibilidade de serem disparados, ocorre nos picos da tensão de alimentação (zero crossing), e zero natural da corrente plena do reator. Essa situação corresponde a $\alpha = 90^\circ$ e que, teoricamente, pode ser variado continuamente até 180° . Essa última situação corresponderia a corrente nula no indutor. Dessa forma, a faixa de controle entre 90° e 180° do conversor está disponível para ajuste da potência reativa do sistema elétrico. Na prática, o ângulo de disparo máximo permitido aos semicondutores situa-se entre 170° e 175° . Garante-se com esse procedimento ausência de falhas de comutação entre os tiristores, situação esta possível de ocorrer com ângulos de disparo aproximando-se do limite de 180° .

A partir das considerações efetuadas, a expressão que define o valor eficaz da corrente na frequência fundamental no indutor do RTC, é dado por [8]:

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{U}{\omega \cdot L} \left(2 - \frac{2}{\pi} \alpha + \frac{1}{\pi} \text{sen } 2\alpha \right) \quad (2.29)$$

$$\text{Para, } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$$

U - valor eficaz da tensão de alimentação;

$I_{LF}(\alpha)$ - valor eficaz da corrente na frequência fundamental no indutor.

Incluindo-se o capacitor necessário à formação do compensador estático, tem-se as formas de onda correspondentes apresentadas na figura 2.18. Nesta figura, tem-se:

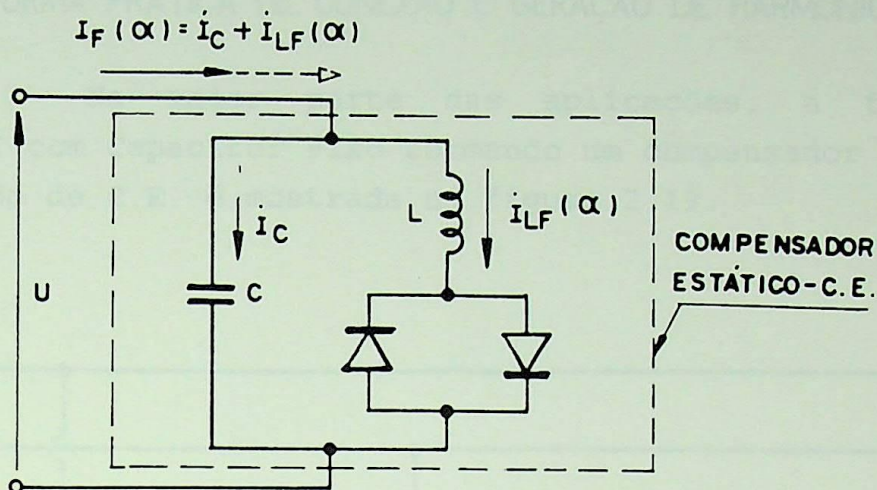
$I(\alpha)$ - corrente eficaz total na frequência fundamental;

$I_F(\alpha)$ - componente fundamental $i(\alpha)$;

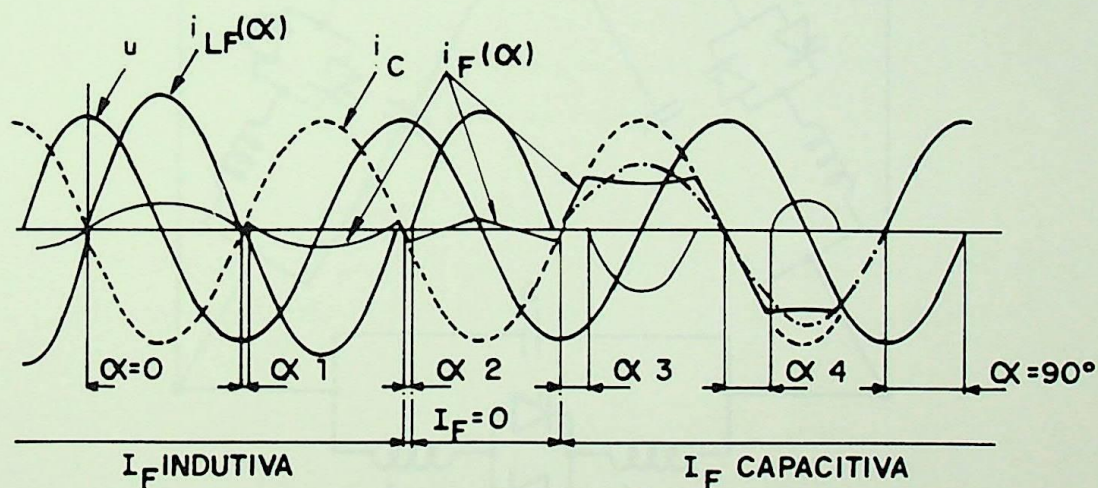
$$Q_L < Q_C$$

A partir da equação (2.29), pode-se escrever para o módulo do componente fundamental da corrente eficaz total:

$$I_F(\alpha) = I_C - I_{LF} = \dot{U} \cdot \left[\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L} \left(2 - \frac{2}{\pi} \alpha + \frac{1}{\pi} \text{sen } 2\alpha \right) \right] \quad (2.30)$$



a) Circuito monofásico



(b) Processo de controle da corrente no compensador estático
 Figura 2.18 - Processo de controle da corrente reativa no RCT
 com capacitores fixos

Através dessa última equação, por convenção, a corrente total é capacitiva quando $I_F(\alpha)$ é positiva, e indutiva quando $I_F(\alpha)$ é negativa. Salienta-se que a corrente muda de máximo indutivo ao máximo capacitivo apenas em um ciclo e meio.

2.4.2. FORMA PRÁTICA DE CONEXÃO E GERAÇÃO DE HARMÔNICOS

Na maior parte das aplicações, a forma de conexão do RCT com Capacitor Fixo formando um compensador estático aqui denominado de C.E. é mostrada na figura 2.19.

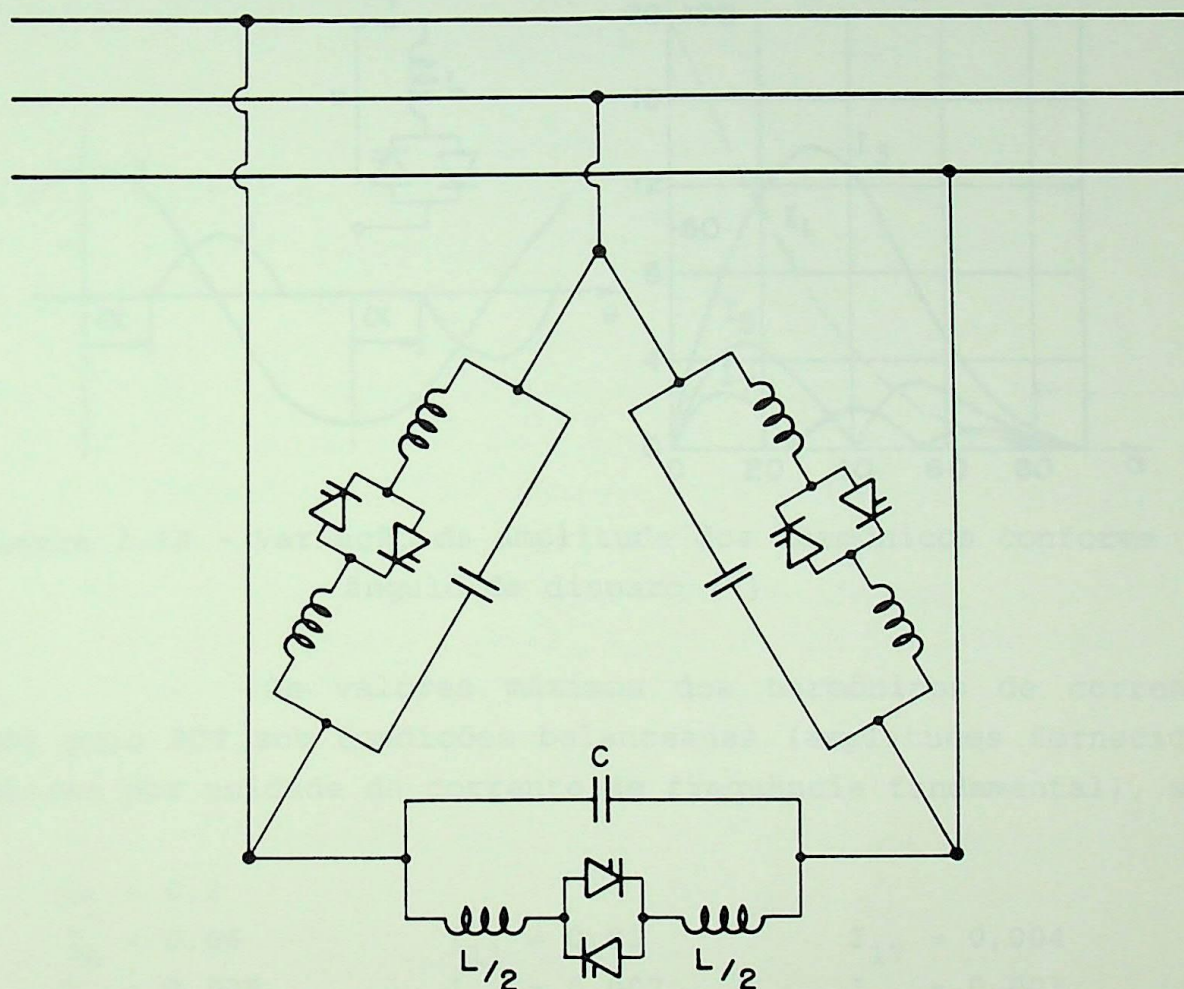


Figura 2.19 - Circuito prático de utilização de RCT com Capacitores Fixos

A conexão apresentada na figura anterior evita, quando na compensação de cargas equilibradas, a injeção de correntes de 3° harmônico e seus múltiplos ímpares. No entanto, é usual a utilização de filtros sintonizados nessa frequência. A

amplitude dos harmônicos de corrente estão estreitamente relacionados ao valor do ângulo de disparo selecionado para a compensação. A figura 2.20 apresenta um gráfico mostrando a variação percentual das amplitudes dos harmônicos em função da variação do ângulo de disparo dos tiristores, para um controlador monofásico.

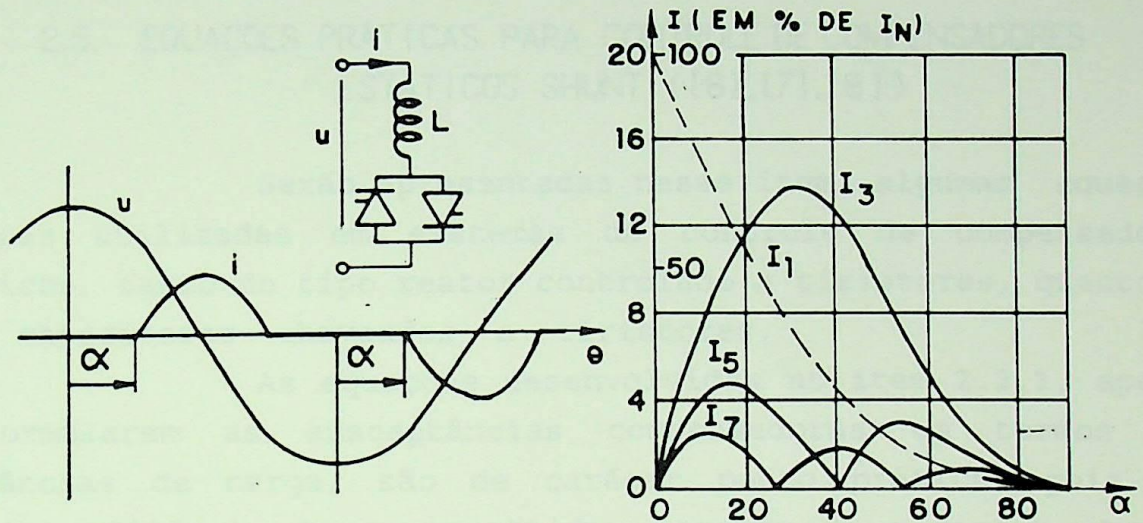


Figura 2.20 - Variação da amplitude dos harmônicos conforme ângulo de disparo [7].

Os valores máximos dos harmônicos de corrente gerados pelo RCT sob condições balanceadas (amplitudes fornecidas em valores por unidade da corrente de frequência fundamental), são [7]:

$$\begin{array}{lll}
 I_3 = 0,2 & & \\
 I_5 = 0,05 & I_{11} = 0,01 & I_{17} = 0,004 \\
 I_7 = 0,025 & I_{13} = 0,007 & I_{19} = 0,003
 \end{array}$$

Esses componentes harmônicos superpostos àqueles produzidos pelas cargas não-lineares, podem resultar em altos níveis de distorções no ponto de acoplamento comum PAC, e devem ser previstos filtros que minimizem o efeito dessas frequências no sistema elétrico [5]. Assim, 75% da potência reativa capacitiva normalmente são utilizadas como filtros de 3^o, 5^o e 7^o harmônicos, além de também atuarem na compensação do fator de potência. O

restante da potência capacitiva obviamente é incluída de modo normal.

Cabe ainda lembrar que alguns sistemas utilizam o RCT a doze pulsos, tornando desnecessário os citados filtros, quando de operações equilibradas, porém tornando mais complexo o sistema de controle, e mais oneroso o equipamento.

2.5. EQUAÇÕES PRÁTICAS PARA CONTROLE DE COMPENSADORES ESTÁTICOS SHUNT ([6],[7],[8])

Serão apresentadas nesse ítem, algumas equações práticas utilizadas em sistemas de controle de compensadores estáticos, tanto do tipo reator controlado a tiristores, quanto do tipo capacitores chaveados a tiristores.

As equações desenvolvidas no ítem 2.2.1, apesar de formularem as susceptâncias compensadoras em termos das admitâncias de carga, são de caráter pouco prático, pois são grandezas difíceis de serem obtidas através de medições. Assim, para sistemas de controle que fazem uso diretamente das medições de corrente e potência, serão mostradas alguns sistemas de equações particularmente úteis para serem implementados na prática. Cabe lembrar que essas alternativas de controle apresentadas derivam das equações desenvolvidas nos ítems 2.2.1 e 2.2.2.

O primeiro grupo de equações de particular interesse é:

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - K_1 R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{bc}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_b \right\} - K_2 R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{ca}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_a \right\} \\
 B_{bc}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - K_1 R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{ca}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_c \right\} - K_2 R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{ab}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_b \right\} \\
 B_{ca}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - K_1 R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{ab}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_a \right\} - K_2 R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{bc}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_c \right\}
 \end{aligned} \right\} (2.31)$$

onde:

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{R_{TH}}{3X_{TH}};$$

$$K_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{R_{TH}}{3X_{TH}};$$

R_{TH} e X_{TH} - resistência e reatância indutiva equivalente do sistema;

U_{ij}^* - conjugado da tensão entre as fases "i" e "j"

$R_e \left\{ \left[\frac{\dot{U}_{ij}^*}{\sqrt{3} U} \right] \cdot \dot{I}_i \right\}$ - potência média na fase "i"

As quantidades fasoriais utilizadas na equação anterior devem ser equacionadas em funções do tempo, tornando-as mais simples para o processo de medição. Assim,

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - K_1 i_b(t) \left| \begin{array}{l} u_{bc} > 0 \\ du_{bc}/dt = 0 \end{array} \right. - K_2 i_a(t) \left| \begin{array}{l} u_{ca} > 0 \\ du_{ca}/dt = 0 \end{array} \right. \\
 B_{bc}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - K_1 i_c(t) \left| \begin{array}{l} u_{ca} > 0 \\ du_{ca}/dt = 0 \end{array} \right. - K_2 i_b(t) \left| \begin{array}{l} u_{ab} > 0 \\ du_{ab}/dt = 0 \end{array} \right. \\
 B_{ca}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - K_1 i_a(t) \left| \begin{array}{l} u_{ab} > 0 \\ du_{ab}/dt = 0 \end{array} \right. - K_2 i_c(t) \left| \begin{array}{l} u_{bc} > 0 \\ du_{bc}/dt = 0 \end{array} \right.
 \end{aligned} \right\} (2.32)$$

OBS.: $\left| \begin{array}{l} u_{ij} > 0 \\ du_{ij}/dt = 0 \end{array} \right.$ - significa amostrar a corrente indicada quando a derivada de $u_{ij}(t)$ é igual a zero e a tensão $u_{ij}(t)$ for maior que zero (picos positivos das tensões entre fases).

Multiplicando-se as igualdades obtidas nas equações (2.32) por $(\sqrt{3} U)$, obtém-se as necessidades de potência reativa em termos da potência média consumida. Isto é,

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (3 U^2) &= - K_1 \operatorname{Re} \left\{ U_{bc}^* \cdot I_b \right\} - K_2 \operatorname{Re} \left\{ U_{ca}^* \cdot I_a \right\} \\
 B_{bc}^{(c)} (3 U^2) &= - K_1 \operatorname{Re} \left\{ U_{ca}^* \cdot I_c \right\} - K_2 \operatorname{Re} \left\{ U_{ab}^* \cdot I_b \right\} \\
 B_{ca}^{(c)} (3 U^2) &= - K_1 \operatorname{Re} \left\{ U_{ab}^* \cdot I_a \right\} - K_2 \operatorname{Re} \left\{ U_{bc}^* \cdot I_c \right\}
 \end{aligned} \right\} (2.33)$$

Para que tenha utilidade prática é necessário que esse último conjunto de equações expressem as correntes e tensões em função do tempo, ou seja:

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (3 U^2) &= -K_1 \frac{1}{T} \int_{(T)} u_{bc}(t) \cdot i_b(t) \cdot dt - K_2 \frac{1}{T} \int_{(T)} u_{ca}(t) \cdot i_a(t) \cdot dt \\
 B_{bc}^{(c)} (3 U^2) &= -K_1 \frac{1}{T} \int_{(T)} u_{ca}(t) \cdot i_c(t) \cdot dt - K_2 \frac{1}{T} \int_{(T)} u_{ab}(t) \cdot i_b(t) \cdot dt \\
 B_{ca}^{(c)} (3 U^2) &= -K_1 \frac{1}{T} \int_{(T)} u_{ab}(t) \cdot i_a(t) \cdot dt - K_2 \frac{1}{T} \int_{(T)} u_{bc}(t) \cdot i_c(t) \cdot dt
 \end{aligned} \right\} (2.34)$$

onde:

T - período de tempo da onda na frequência industrial.

As equações desenvolvidas mostram as necessidades de compensação entre fases a partir da amostra de duas correntes em fase com a tensões de linha apropriadas (equações 2.31 e 2.32), bem como em termos de potência média (equações 2.33 e 2.34). É muito importante lembrar que as 4 equações anteriores satisfazem as condições estabelecidas em (2.16), (2.17) e (2.24). Isto é, anulam os componentes de sequência negativa da corrente de carga, assim como torna nula a queda de tensão em fase na impedância de suprimento.

Utilizando-se novamente das equações discriminadas nos itens 2.2.1 e 2.2.2, além das 4 últimas equações, pode-se calcular as susceptâncias necessárias para efetuar a compensação em termos das correntes de carga reativa. Ou seja,

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} \left[I_m \left\{ \frac{\dot{U}_a^*}{U} \dot{i}_a \right\} + I_m \left\{ \frac{\dot{U}_b^*}{U} \dot{i}_b \right\} - I_m \left\{ \frac{\dot{U}_c^*}{U} \dot{i}_c \right\} \right] \\
 B_{bc}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} \left[I_m \left\{ \frac{\dot{U}_b^*}{U} \dot{i}_b \right\} + I_m \left\{ \frac{\dot{U}_c^*}{U} \dot{i}_c \right\} - I_m \left\{ \frac{\dot{U}_a^*}{U} \dot{i}_a \right\} \right] \\
 B_{ca}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} \left[I_m \left\{ \frac{\dot{U}_c^*}{U} \dot{i}_c \right\} + I_m \left\{ \frac{\dot{U}_a^*}{U} \dot{i}_a \right\} - I_m \left\{ \frac{\dot{U}_b^*}{U} \dot{i}_b \right\} \right]
 \end{aligned} \right\} (2.35)$$

onde:

\dot{U}_i^* - conjugado do fasor de tensão na fase i .

De maneira análoga aos desenvolvimentos anteriores, reescreve-se a equação (2.35) em forma mais apropriada à utilização prática.

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_a(t) \left. \begin{array}{l} du_a/dt > 0 \\ u_a = 0 \end{array} \right| + i_b(t) \left. \begin{array}{l} du_b/dt > 0 \\ u_b = 0 \end{array} \right| - \right. \\
 &\quad \left. - i_c(t) \left. \begin{array}{l} du_c/dt > 0 \\ u_c = 0 \end{array} \right| \right] \\
 B_{bc}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_b(t) \left. \begin{array}{l} du_b/dt > 0 \\ u_b = 0 \end{array} \right| + i_c(t) \left. \begin{array}{l} du_c/dt > 0 \\ u_c = 0 \end{array} \right| - \right. \\
 &\quad \left. - i_a(t) \left. \begin{array}{l} du_a/dt > 0 \\ u_a = 0 \end{array} \right| \right] \\
 B_{ca}^{(c)} (\sqrt{3} U) &= - \frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_c(t) \left. \begin{array}{l} du_c/dt > 0 \\ u_c = 0 \end{array} \right| + i_a(t) \left. \begin{array}{l} du_a/dt > 0 \\ u_a = 0 \end{array} \right| - \right. \\
 &\quad \left. - i_b(t) \left. \begin{array}{l} du_b/dt > 0 \\ u_b = 0 \end{array} \right| \right]
 \end{aligned} \right\} (2.36)$$

O significado dos termos no equacionamento (2.36) é similar àqueles da equação (2.32).

Além dos componentes reativos da corrente de carga, pode-se analisar a compensação através do "consumo" de potência em quadratura efetuada pela carga. Assim,

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (3 U^2) &= - I_m \left\{ \dot{U}_a^* \cdot \dot{i}_a \right\} - I_m \left\{ \dot{U}_b^* \cdot \dot{i}_b \right\} + I_m \left\{ \dot{U}_c^* \cdot \dot{i}_c \right\} \\
 B_{bc}^{(c)} (3 U^2) &= - I_m \left\{ \dot{U}_b^* \cdot \dot{i}_b \right\} - I_m \left\{ \dot{U}_c^* \cdot \dot{i}_c \right\} + I_m \left\{ \dot{U}_a^* \cdot \dot{i}_a \right\} \\
 B_{ca}^{(c)} (3 U^2) &= - I_m \left\{ \dot{U}_c^* \cdot \dot{i}_c \right\} - I_m \left\{ \dot{U}_a^* \cdot \dot{i}_a \right\} + I_m \left\{ \dot{U}_b^* \cdot \dot{i}_b \right\}
 \end{aligned} \right\} (2.37)$$

Equacionando-se em função do tempo, vem:

$$\left. \begin{aligned}
 B_{ab}^{(c)} (3 U^2) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{(T)} \left[u_{bc}(t) \cdot i_a(t) + u_{ca}(t) \cdot i_b(t) - \right. \\
 &\quad \left. - u_{ab}(t) \cdot i_c(t) \right] dt \\
 B_{bc}^{(c)} (3 U^2) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{(T)} \left[u_{ca}(t) \cdot i_b(t) + u_{ab}(t) \cdot i_c(t) - \right. \\
 &\quad \left. - u_{bc}(t) \cdot i_a(t) \right] dt \\
 B_{ca}^{(c)} (3 U^2) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{(T)} \left[u_{ab}(t) \cdot i_c(t) + u_{bc}(t) \cdot i_a(t) - \right. \\
 &\quad \left. - u_{ca}(t) \cdot i_b(t) \right] dt
 \end{aligned} \right\} (2.38)$$

As equações 2.35, 2.36, 2.37 e 2.38 atendem as condições 2.15, 2.16 e 2.17. Dessa maneira elas anulam os componentes de sequência negativa, bem como o componente reativo de sequência positiva. Naturalmente, a condição de nulidade da queda de tensão em fase na impedância do sistema não é satisfeita através desses quatro últimos conjuntos de equações.

2.6. SISTEMAS DE CONTROLE DE COMPENSADORES ESTÁTICOS SHUNT

Apresenta-se nesse ítem uma descrição básica de sistemas de controle para compensadores estáticos do tipo CCT e RCT com capacitores fixos. Os processos tratados aqui partem do pressuposto que a carga é desequilibrada e provoca com isso desequilíbrios nas correntes do sistema. Em linhas gerais, as

equações necessárias são aquelas desenvolvidas no ítem anterior.

2.6.1. CONTROLE DE CAPACITORES CHAVEADOS A TIRISTORES

Em virtude dos capacitores serem apenas chaveados, o controle da demanda de reativos por parte desse tipo de equipamento se apresenta bem mais simples que o RCT com capacitores fixos. Na figura 2.21 são apresentados os componentes básicos necessários a um sistema de controle de capacitores chaveados a tiristores compensando carregamento desbalanceado. Nesta figura, as unidades capacitivas entre as fases do circuito compensador, são inseridas ou retiradas pelos tiristores, segundo as necessidades de compensação e balanceamento.

Para a medição da potência reativa exigida para compensação, pode-se utilizar o conjunto de equações (2.35), em que a potência reativa entre fases para a fase AB é:

$$B_{ab}^{(c)} (3 U^2) = \frac{1}{\sqrt{3} T} \int_{(T)} \left[u_{bc}(t) \cdot i_a(t) + u_{ca}(t) \cdot i_b(t) - u_{ab}(t) \cdot i_c(t) \right] dt$$

Através dessas equações pode-se atualizar, a cada ciclo de tensão (à frequência industrial), a potência reativa necessária a correção do fator de potência e atenuação do desequilíbrio. A informação final que deve ser fornecida, é o número de bancos de capacitores a serem conectados entre as fases do sistema elétrico. É importante salientar que essa informação deve estar disponível às unidades de disparo antes da tensão de linha, correspondente ao ramo do delta do compensador em questão alcançar seu valor de pico com a polaridade correta. A partir daí, ocorre a inserção dos capacitores no sistema através do envio do sinal de gatilho aos tiristores de interesse.

Quanto ao tempo de atraso para a inserção dos bancos, esse é no máximo de um ciclo, na hipótese dos bancos estarem carregados com a polaridade errada. Para retirada dos capacitores do sistema, o tempo necessário é reduzido para

meio-ciclo.

No ítem a seguir são formuladas algumas soluções de controle facilmente adaptáveis ao esquema capacitores/indutores chaveados a tiristores [8], que é uma alternativa mais flexível de correção.

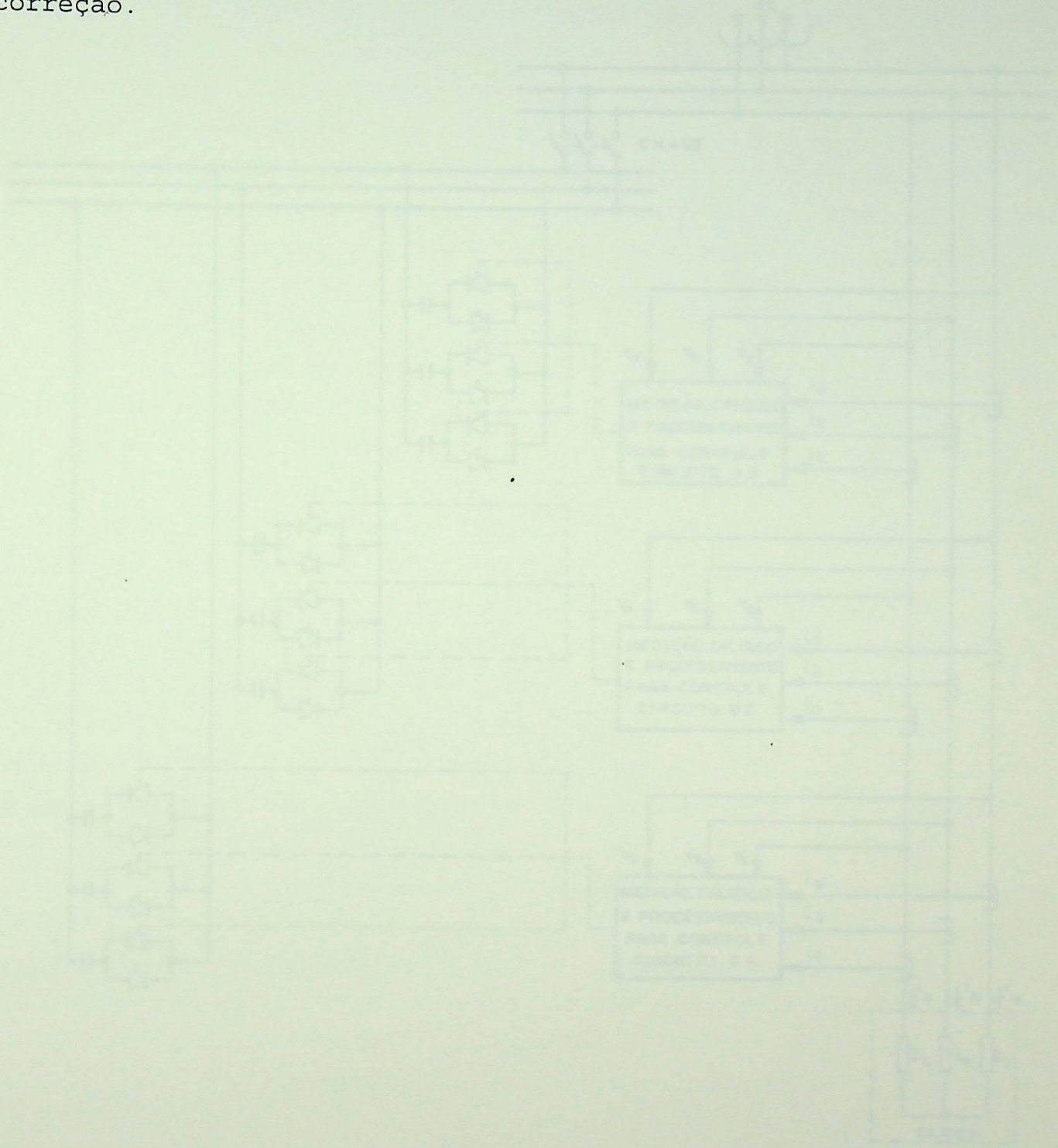


Figura 2.11 - Diagrama básico de controle de capacitores chaveados a tiristores

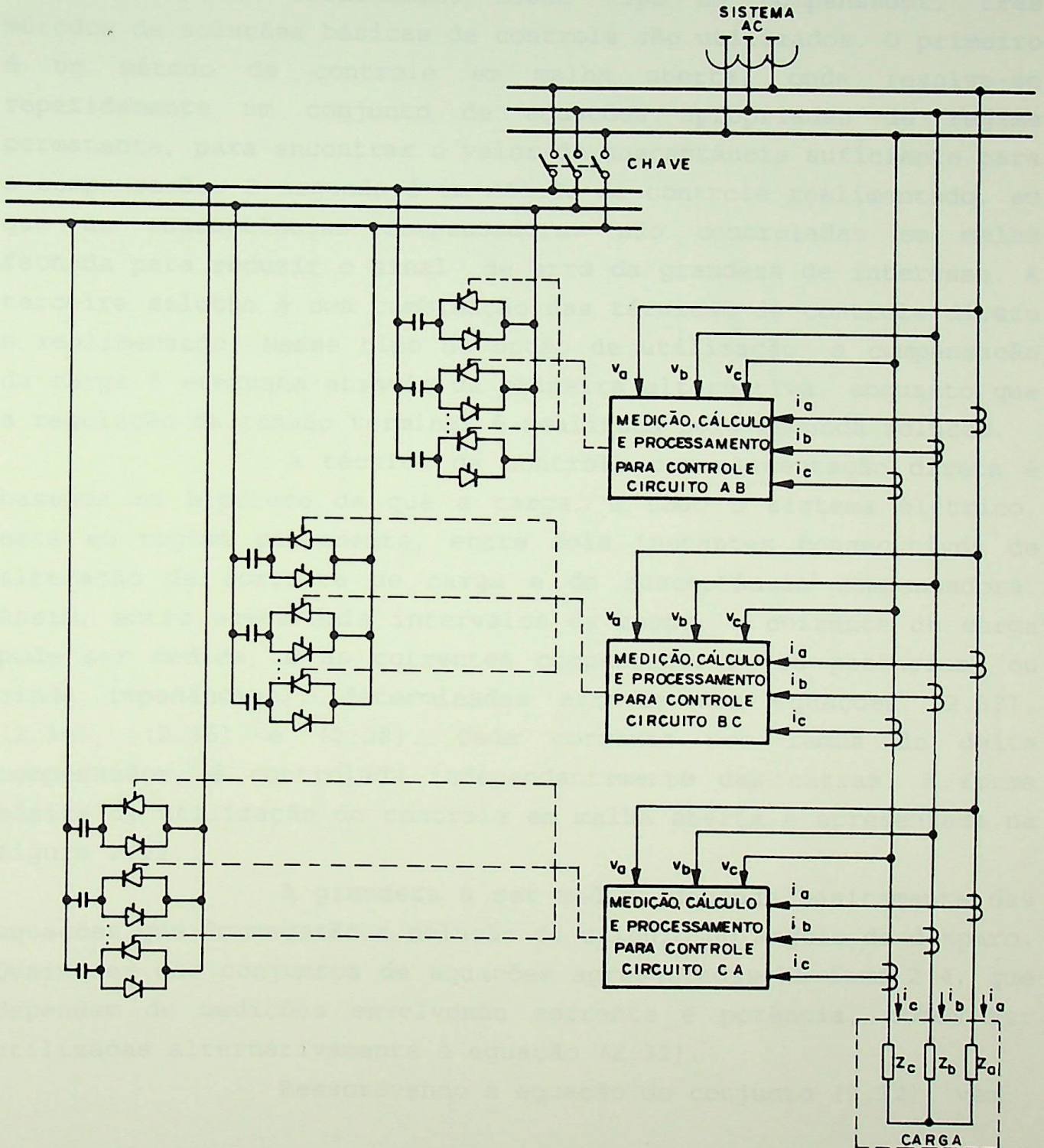


Figura 2.21 - Diagrama básico de controle de capacitores chaveados a tiristores

2.6.2. CONTROLE DE REATORES CONTROLADOS A TIRISTORES COM CAPACITORES FIXOS

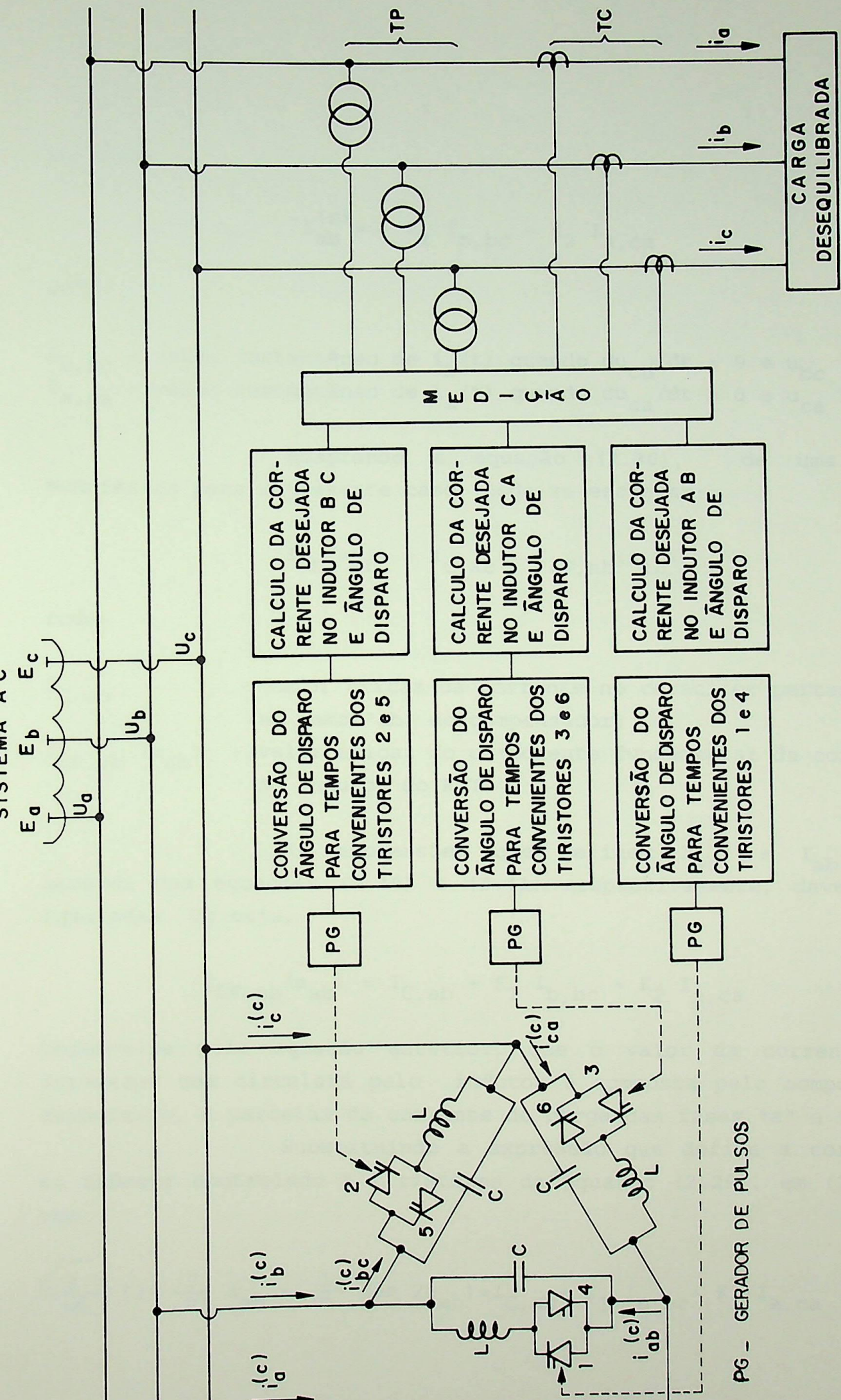
Geralmente, nesse tipo de compensador, três métodos de soluções básicas de controle são utilizados. O primeiro é um método de controle em malha aberta, onde resolve-se repetidamente um conjunto de equações apropriadas de regime permanente, para encontrar o valor da susceptância suficiente para a compensação. O segundo é um método de controle realimentado, em que as susceptâncias compensadoras são controladas em malha fechada para reduzir o sinal de erro da grandeza de interesse. A terceira solução é uma combinação das técnicas de controle direto e realimentado. Nesse tipo de opção de utilização, a compensação da carga é efetuada através da primeira alternativa, enquanto que a regulação da tensão terminal é realizada pela segunda solução.

A técnica de controle com alimentação direta é baseada na hipótese de que a carga, e todo o sistema elétrico, está em regime permanente, entre dois instantes consecutivos de alteração da corrente de carga e da susceptância compensadora. Assim, entre esses dois intervalos de tempo, a corrente de carga pode ser medida, e as correntes compensadoras (ou potências, ou ainda impedâncias), determinadas através das equações (2.32), (2.34), (2.36) e (2.38). Cada corrente nos ramos do delta compensador, é controlada independentemente das outras. A forma básica de utilização do controle em malha aberta é apresentada na figura 2.22.

A grandeza a ser medida depende basicamente das equações que fornecerão a solução de cálculo do ângulo de disparo. Quaisquer dos conjuntos de equações apresentadas no item 2.4, que dependem de medições envolvendo corrente e potência, podem ser utilizadas alternativamente à equação (2.32).

Reescrevendo a equação do conjunto (2.32), vem:

$$I_{ab}^{(c)} = -K_1 i_b(t) \left| \begin{array}{l} u_{bc} > 0 \\ du_{bc}/dt=0 \end{array} \right. - K_2 i_a(t) \left| \begin{array}{l} u_{ca} > 0 \\ du_{ca}/dt=0 \end{array} \right. \quad (2.39)$$



ESQUEMA DE COMPENSAÇÃO DA CARGA COM CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO DIRETA.

ou ainda,

$$I_{ab}^{(c)} = -K_1 I_{b,bc} - K_2 I_{a,ca} \quad (2.40)$$

onde:

$I_{b,bc}$ - valor instantâneo de $i_b(t)$ quando $du_{cb}/dt = 0$ e $u_{bc} > 0$;
 $I_{a,ca}$ - valor instantâneo de $i_a(t)$ quando $du_{ca}/dt = 0$ e $u_{ca} > 0$.

Adaptando a equação (2.30), de uma rede monofásica para o presente caso, pode-se escrever:

$$I_{ab}(\alpha_{ab}) = I_{C,ab} - I_{LF,ab}(\alpha_{ab}) \quad (2.41)$$

onde:

$I_{C,ab}$ - valor eficaz da corrente no capacitor pertencente ao ramo "ab" do compensador;
 $I_{LF,ab}(\alpha_{ab})$ - valor eficaz do componente fundamental da corrente no indutor do RCT.

As expressões que definem $I_{ab}^{(c)}$ e $I_{ab}(\alpha_{ab})$, através das equações (2.40) e (2.41) respectivamente, devem ser igualadas. Ou seja,

$$I_{LF,ab}(\alpha_{ab}) = I_{C,ab} + K_1 I_{b,bc} + K_2 I_{a,ca} \quad (2.42)$$

Observa-se pela equação anterior, que o valor da corrente de interesse que circulará pelo indutor é composta pelo componente capacitivo, e parcelas da corrente de carga das fases "a" e "b".

Substituindo a expressão que define a corrente no indutor controlado a tiristores da equação (2.29), em (2.42), vem:

$$\frac{\sqrt{3} U}{\omega L} \left(2 - \frac{2}{\pi} \alpha_{ab} + \frac{1}{\pi} \text{sen } 2\alpha_{ab} \right) = I_{C,ab} + K_1 I_{b,bc} + K_2 I_{a,ca} \quad (2.43)$$

Pode-se aplicar qualquer método de solução de equações não-lineares (Newton-Raphson, por exemplo), na resolução da expressão anterior. O ângulo alfa determinado então, fará com que circule uma tal corrente no indutor que, combinado a corrente do capacitor, atuará no sentido de anular o desequilíbrio e corrigir o ângulo de fase da corrente de suprimento à carga.

A figura a seguir ilustra como podem ser obtidas as quantidades " $K_1 I_{b,bc}$ " e " $K_2 I_{a,ca}$ " a partir das formas de onda das tensões e correntes de carga.

Pela figura pode-se observar os procedimentos a serem realizados no processo de controle do desequilíbrio da carga. As correntes $I_{a,ca}$ e $I_{b,bc}$ devem ser amostradas no meio-ciclo que antecede a condição de disparo dos tiristores envolvidos. Assim, no intervalo 1 indicado na figura 2.23, quando a tensão $u_{ca}(\omega t)$ alcança seu pico negativo, a corrente i_a é amostrada e acrescida do sinal negativo ($-I_{a,ca}$). As correntes de fase podem ser amostradas no pico negativo da tensão, desde que acrescidos do sinal negativo. Nos instantes que se sucedem quando a tensão $u_{bc}(\omega t)$ alcança seu pico positivo, a corrente i_b é amostrada ($I_{b,bc}$). No momento em que a tensão $u_{ab}(\omega t)$ alcança seu valor de pico negativo, ocorre a composição indicada na equação (2.43). A equação é então solucionada, e enviado um pulso de gatilho para o tiristor 4, ajustado no ângulo de disparo determinado anteriormente.

O sistema de controle realimentado é utilizado, basicamente, na regulação da tensão em redes de transmissão AC. No entanto, usualmente são encontrados esse tipo de solução acompanhando o sistema em malha aberta, descrito anteriormente. O princípio básico de funcionamento consiste na variação incremental dos tempos de disparo dos tiristores dos RCT's, que correspondem a um sinal de erro gerado pela diferença entre a grandeza de interesse medida, e o valor adotado como referência. Dessa maneira, quando ocorre uma alteração no sinal de erro, resulta em uma variação contrária no valor efetivo da susceptância do reator controlado a tiristores. O objetivo é manter o erro próximo a zero. A figura 2.24 a seguir ilustra o esquema de controle

realimentado, com seus elementos funcionais básicos.

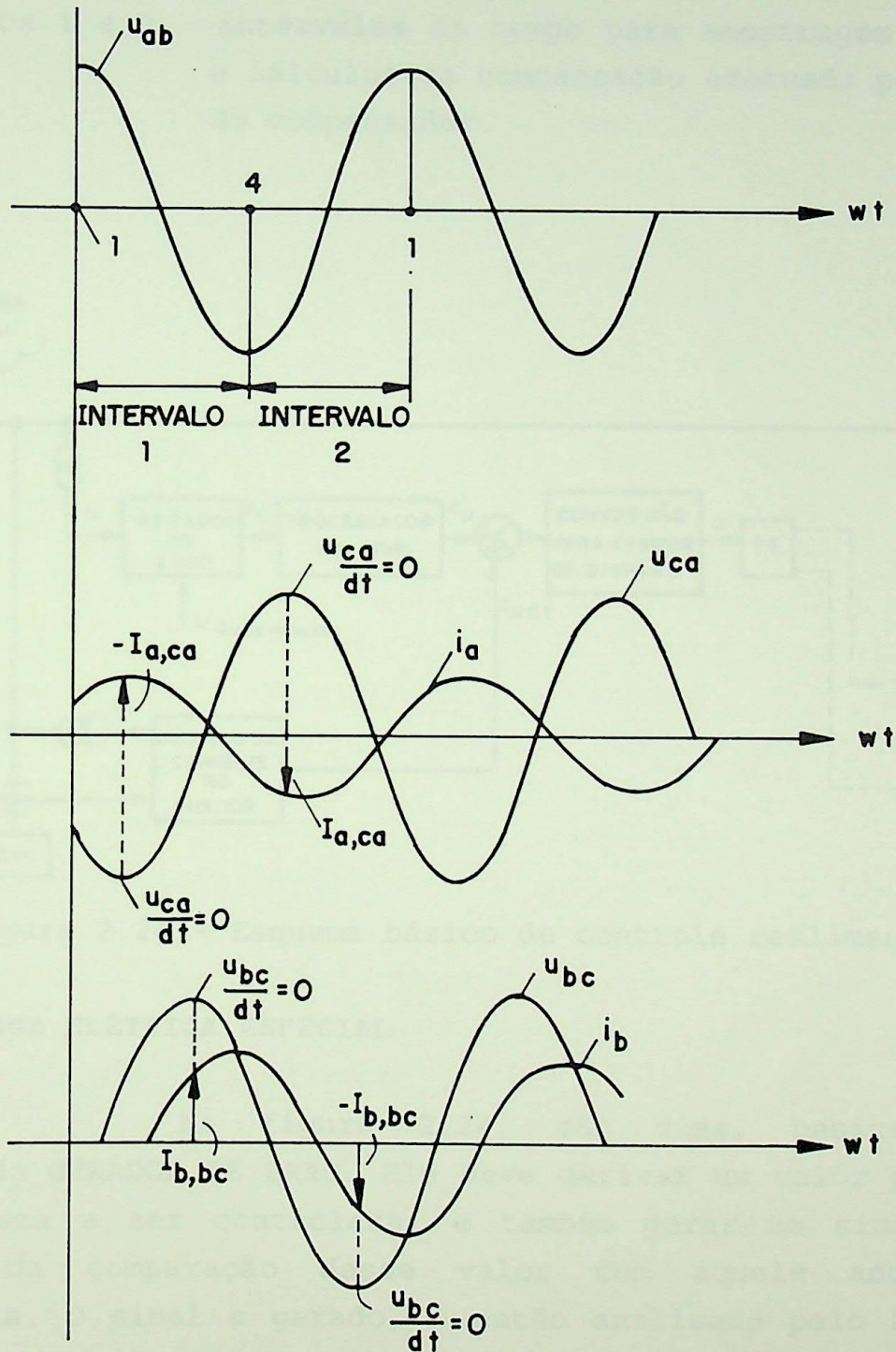


Figura 2.23 - Processo de amostragem dos sinais para cálculo da compensação exercida pelo ramo AB do compensador

Na figura 2.23, tem-se:

Instantes 1 e 4 - tempos em que os tiristores passam a ter condições de disparo;
 intervalos 1 e 2 - intervalos de tempo para amostragem dos sinais e cálculos da compensação efetuada pelo ramo AB do compensador.

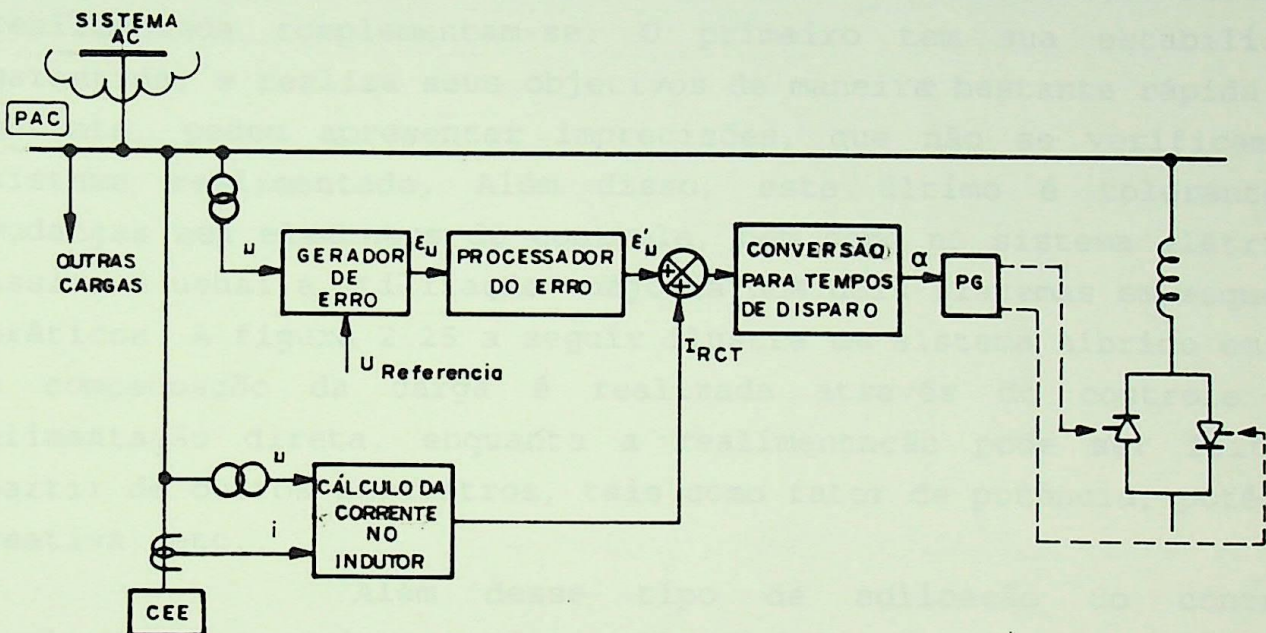


Figura 2.24 - Esquema básico de controle realimentado

CEE - CARGA ELÉTRICA ESPECIAL

Na figura 2.24, são duas, basicamente, as funções do GERADOR DE ERRO. Ele deve derivar um valor paramétrico da grandeza a ser controlada, e também gerar um sinal de erro através da comparação desse valor com aquele adotado como referência. O sinal ϵ gerado, é então analisado pelo PROCESSADOR DO ERRO. O sinal ϵ' , indicado na figura, representa em geral a soma de dois termos. O primeiro proporcional ao sinal de erro (ϵ), e o segundo proporcional à integral de ϵ . O bloco correspondente a CONVERSÃO DO ERRO PROCESSADO PARA TEMPOS DE DISPARO, converte o

sinal resultante do processador do erro (ε'), para o ângulo de ignição dos tiristores. O gerador de pulsos (PG) é sincronizado à tensão fase-fase correspondente, e repetido a cada meio ciclo.

Salienta-se que o sinal escolhido para o controle realimentado não deve estar sujeito a harmônicos ou ruídos elétricos. Os valores amostrados (amplitudes), podem conduzir a erros e posterior mascaramento dos ângulos de disparo calculados. Sugere-se a utilização de valores rms, medidos em um, ou mesmo em meio ciclo.

As soluções de controle com alimentação direta e realimentada complementam-se. O primeiro tem sua estabilidade garantida, e realiza seus objetivos de maneira bastante rápida. No entanto, podem apresentar imprecisões, que não se verificam no sistema realimentado. Além disso, este último é tolerante a mudanças nos elementos de controle, bem como no sistema elétrico. Assim, é usual a utilização conjunta dos dois sistemas em esquemas práticos. A figura 2.25 a seguir ilustra um sistema híbrido em que a compensação da carga é realizada através do controle com alimentação direta, enquanto a realimentação pode ser feita a partir de outros parâmetros, tais como fator de potência, potência reativa, etc..

Além desse tipo de aplicação do controle realimentado complementando aquele de alimentação direta, outras variantes são encontradas. Como exemplo, pode-se citar a realimentação negativa da corrente no indutor, cuja finalidade é aumentar a precisão da corrente desejada no reator do RCT, para conversão a ângulo de disparo.

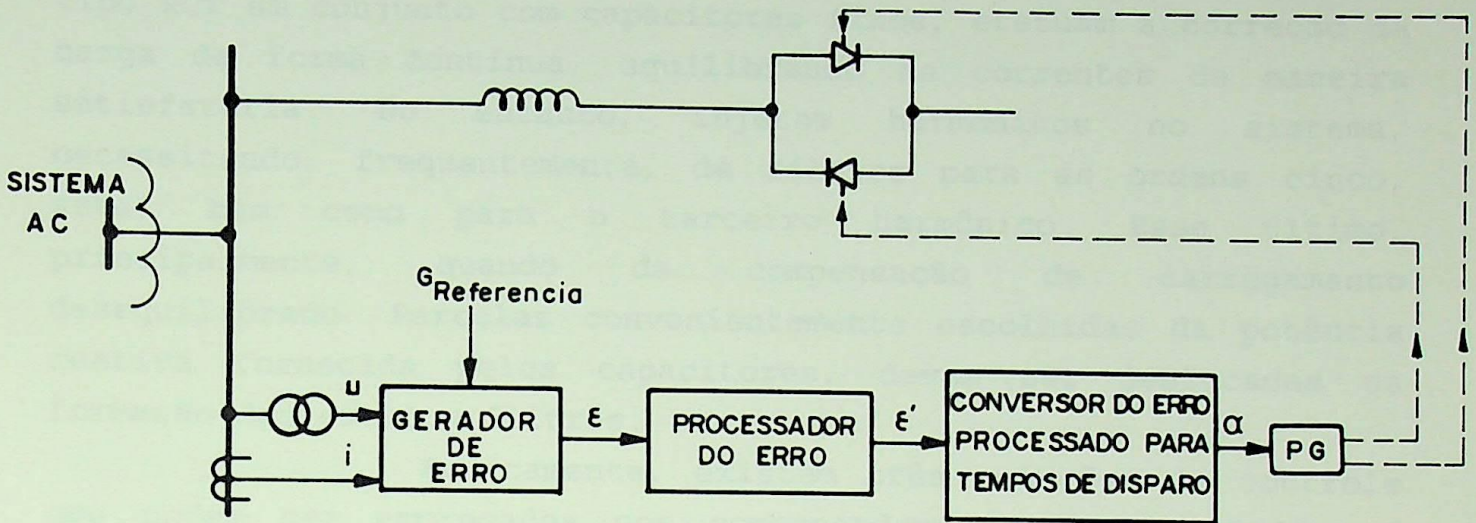


Figura 2.25 - Esquema de controle com compensação da carga através de alimentação direta, e regulação da tensão por realimentação

2.7. CONCLUSÕES

Os compensadores estáticos do tipo CCT e RCT em conjunto com capacitores fixos, são capazes de efetuar a compensação da carga de maneira bastante eficiente. Através de impedâncias ajustáveis às variações da carga, é possível eliminar a presença de componentes de sequência negativa na corrente de carga. Além disso, essas impedâncias reduzem, ou até mesmo anulam, a componente reativa dessa corrente, conduzindo o fator de potência da indústria a valores pré-determinados. São, portanto, equipamentos adequados para compensação das cargas mais problemáticas ao sistema de suprimento de energia. Entre essas, cita-se cargas ferroviárias monofásicas, fornos a arco e indução, máquinas de solda, laminadores, etc.

Os capacitores chaveados a tiristores, apesar de não introduzir harmônicos adicionais no sistema elétrico, efetuem a compensação em degraus. Além disso, eles não conseguem balancear totalmente a potência média absorvida pela carga, pois não são

capazes de introduzir correntes indutivas compensadoras. Os do tipo RCT em conjunto com capacitores fixos, efetuam a correção da carga de forma contínua, equilibrando as correntes de maneira satisfatória. No entanto, injetam harmônicos no sistema, necessitando, frequentemente, de filtros para as ordens cinco, sete, bem como para o terceiro harmônico. Esse último, principalmente, quando da compensação de carregamento desequilibrado. Parcelas convenientemente escolhidas da potência reativa fornecida pelos capacitores, devem ser deslocadas na formação dos citados filtros.

Basicamente, existem três soluções de controle que podem ser empregados nos compensadores shunt estudados. O sistema do tipo alimentação direta, parte de equações que definem as correntes necessárias à compensação, e calculam diretamente os tempos de disparo dos tiristores. A segunda solução, é o controle realimentado, que mantém os valores paramétricos das variáveis de interesse nos níveis desejados, através de uma malha fechada. A terceira solução é uma combinação das duas técnicas anteriores. Os controles alimentados diretamente são rápidos, e inerentemente estáveis. Por isso, são vantajosos na compensação de cargas que flutuam rapidamente. Os controles realimentados são precisos e tolerantes a alterações nos elementos de controle, e no sistema elétrico.

As equações para o controle do RCT em conjunto com os capacitores fixos que foram analisadas, são utilizadas em esquemas práticos, e capacitam o compensador estático a realizar, de maneira eficiente, a correção da carga. Também as soluções apresentadas em [9], que utilizam basicamente as equações da compensação em termos de componentes simétricos da corrente de carga (ver ítem 2.2.2), mostram-se adequadas para implementações práticas, a partir de microprocessadores.

CAPÍTULO 3

COMPENSAÇÃO SÉRIE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Os capacitores série para compensação da queda de tensão em linhas de transmissão, têm sido usados a mais de meio século. Isso acontece em virtude de, em muitos casos, a regulação automática da tensão ser obtida de forma mais econômica através da sua utilização.

Apesar de ser tecnicamente uma solução eficaz na redução de flutuações da tensão e correção do fator de potência, a sua efetiva utilização ainda não teve o avanço merecido a nível de distribuição de energia. Os complicados métodos de proteção contra sobretensões e o "by-passing" do capacitor durante faltas, além das diferentes possibilidades de ocorrência de ressonâncias, desmotivaram em diversos casos a sua adoção ao longo do tempo em redes de distribuição.

Entretanto, a partir das necessidades de economia na transmissão, da qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores, das restrições ambientais e econômicas que inibem a construção de novas linhas, do custo crescente da potência reativa, além do desenvolvimento do pára-raios de óxido de zinco (ZnO), espera-se novos impulsos na utilização da compensação série. Outro fator que abre novos horizontes na adoção desse tipo de equipamento, é a possibilidade de ampliação do grau de compensação das linhas. Isso acontece em virtude das possibilidades de efetuar-se simulações dos sistemas elétricos em modernos programas de análise de redes, que podem prever fenômenos de ressonância com maior precisão. A partir disso, pode-se estabelecer as precauções a serem tomadas, e/ou identificar os dispositivos para o amortecimento dos transitórios elétricos no sistema.

Mostra-se nos itens a seguir uma análise teórica da compensação série, apresentando os seus benefícios ao sistema bem como dos possíveis problemas que podem ocorrer em linhas com maiores graus de compensação.

3.2. TEORIA BÁSICA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

O objetivo da compensação série é reduzir a reatância indutiva da linha através da inserção de capacitores na mesma. A figura 3.1 ilustra um diagrama unifilar de um alimentador radial simples, que contém carga concentrada no final no ramal.

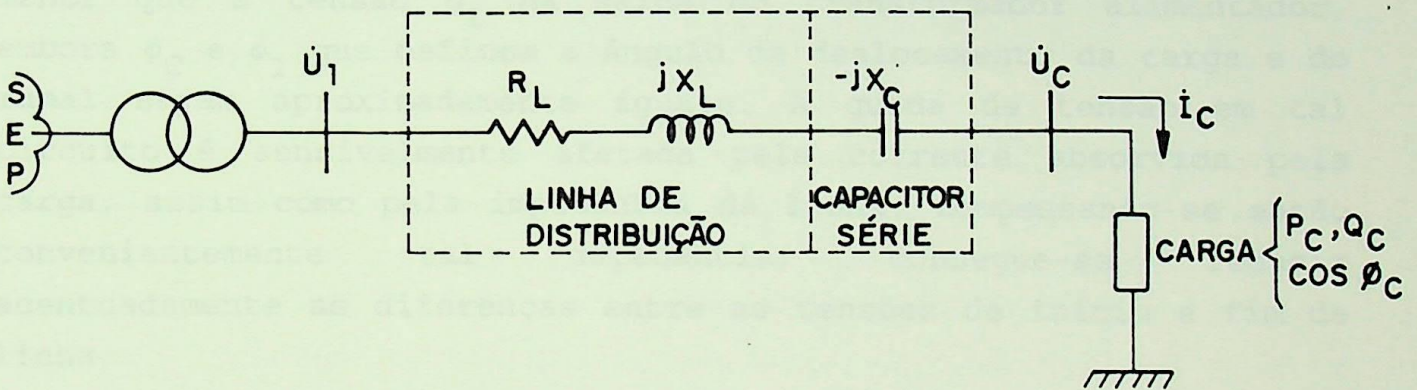


Figura 3.1 - Diagrama monofásico para compensação série

Os diagramas fasoriais para o sistema da figura anterior sem o capacitor série é apresentado na figura a seguir.

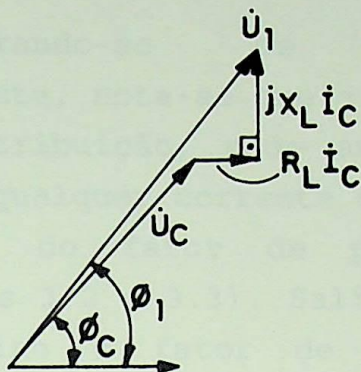


Figura 3.2 - Diagrama fasorial para linha radial sem os capacitores série

Observa-se que a tensão na barra de carga, U_C , é menor que a tensão U_1 na saída do transformador alimentador, embora ϕ_C e ϕ_1 que definem o ângulo de deslocamento da carga e do ramal sejam aproximadamente iguais. A queda de tensão em tal circuito é sensivelmente afetada pela corrente absorvida pela carga, assim como pela impedância da linha. Compensando-se então convenientemente tal impedância, consegue-se reduzir acentuadamente as diferenças entre as tensões de início e fim de linha.

A figura 3.3 apresenta o diagrama fasorial para o sistema da figura 3.1, em que se considerou que ϕ_C e I_C permaneceram sem alterações.

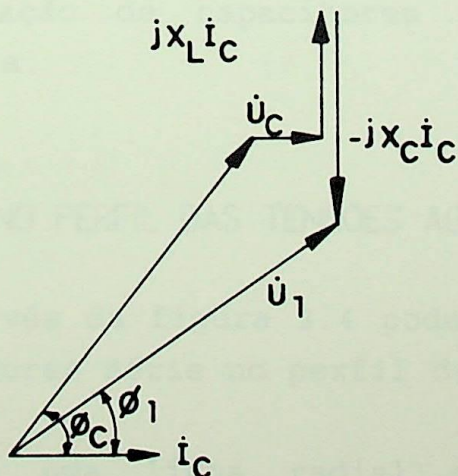


Figura 3.3 - Diagrama fasorial para linha radial com capacitor série

Comparando-se os diagramas fasoriais apresentados anteriormente, nota-se que a inclusão de capacitor em série na linha de distribuição, pode anular a queda de tensão ocorrida no ramal para qualquer corrente de carga. Além disso, ele contribui na elevação do fator de potência do alimentador (comparar ϕ , nas figuras 3.2 e 3.3). Salienta-se, no entanto, que se o ângulo que define o fator de potência da carga for aproximadamente igual a zero, a influência do capacitor em questão nas tensões é insignificante. Para cargas capacitivas, o capacitor série reduzirá a tensão na barra de carga. Dessa forma, para uma adequada utilização desses equipamentos, eles devem ser instalados na compensação de cargas com fortes características indutivas.

Deve ser mencionado também que a melhoria do perfil de tensões na barra de carga, conduzirá a uma diminuição da corrente e utilização mais racional do alimentador, diminuindo as perdas.

Dessa maneira, a utilização desse tipo de compensador serve a diversas aplicações. Pode-se citar a melhoria das tensões do sistema e alívio no carregamento da linha, redução das flutuações de tensão na alimentação de cargas que produzem rápidas variações no consumo de potência reativa, fortalecimento da rede para partida de grandes motores, redução das perdas em linhas e, naturalmente, elevação do fator de potência da instalação. A seguir, analisa-se esses benefícios causados ao sistema, pela instalação de capacitores série nas linhas de distribuição de energia.

3.2.1. MELHORIA NO PERFIL DAS TENSÕES AO LONGO DA LINHA

Através da figura 3.4 pode-se observar o efeito da inclusão de capacitores série no perfil das tensões ao longo do alimentador.

Para uma linha radial conforme figura 3.4, pode-se dizer que a queda de tensão aproximada ao longo do ramal, com a inserção dos capacitores é dada por:

$$\Delta U = R_L \cdot I_C + (X_L - X_C) I_C = \frac{R_L \times P_C + (X_L - X_C) \cdot Q_C}{U_C} \quad (3.1)$$

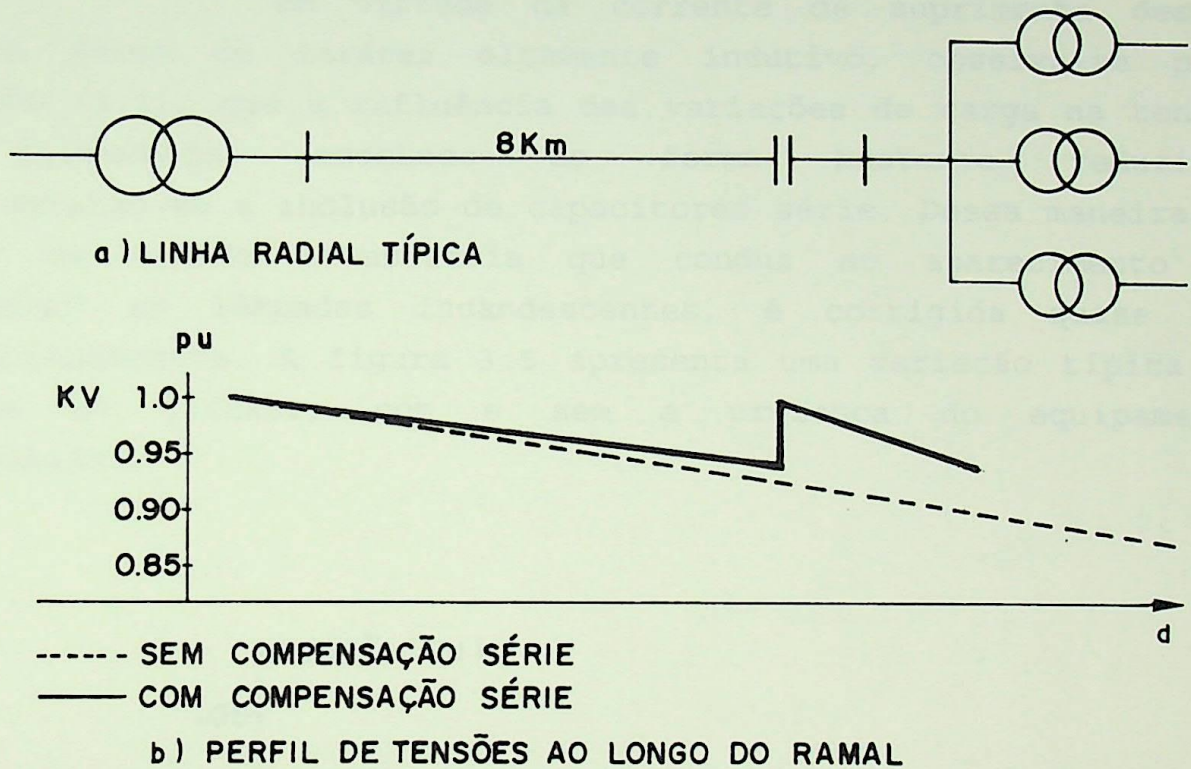


Figura 3.4 - Influência da compensação série no perfil de tensões em linha radial simples

Através da figura anterior e equação (3.1), pode-se notar os benefícios às tensões ao longo de todo alimentador.

3.2.2. REDUÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Os capacitores série são particularmente indicados para circuitos radiais, onde o fenômeno do "flicker" está presente em virtude de flutuações repetitivas da carga (partida frequente de motores, variação constante do carregamento de motores, solda elétrica, fornos a arco, etc).

Em virtude da corrente de suprimento dessas cargas serem de caráter altamente indutivo, observa-se pela equação (3.1), que a influência das variações de carga na tensão do alimentador acontece de forma bastante reduzida, considerando-se a inclusão de capacitores série. Dessa maneira, a queda de tensão transitória que conduz ao aparecimento do "flicker" em lâmpadas incandescentes, é corrigida quase que instantaneamente. A figura 3.5 apresenta uma variação típica da tensão de flicker, com e sem a presença do equipamento compensador.

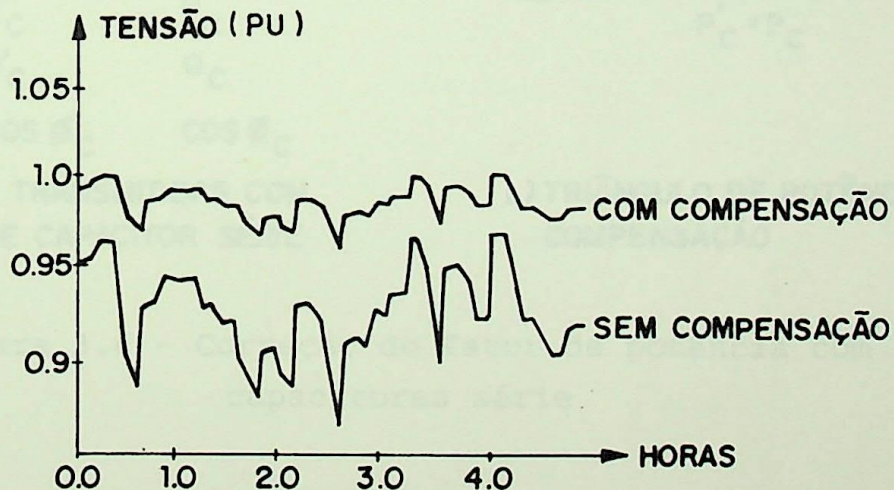


Figura 3.5 - Redução das flutuações de tensão

Através da figura 3.5, nota-se as vantagens que a instalação do compensador série produz na redução das variações da tensão de alimentação do ramal de distribuição de energia.

3.2.3. ELEVAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO ALIMENTADOR

A injeção de potência reativa no sistema, após a inserção de capacitores série acontece segundo a expressão:

$$Q_{CAP} = X_{CAP} \cdot I^2 \quad (3.2)$$

Através da figura 3.6 pode-se visualizar o esquema da compensação efetuada pelo capacitor em série na linha.

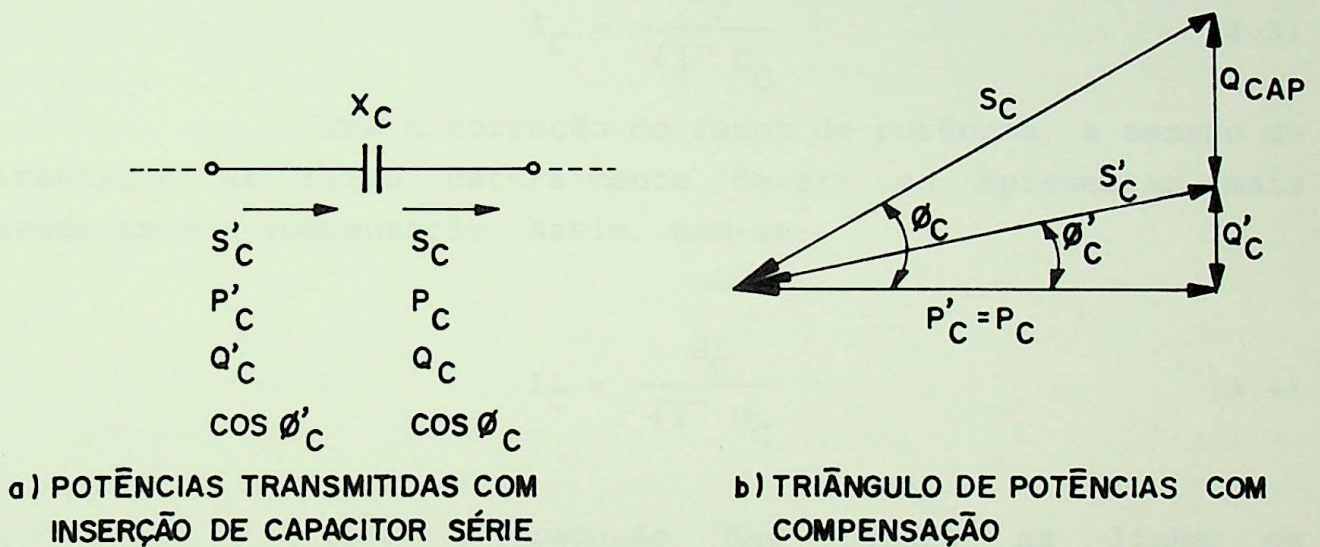


Figura 3.6 - Correção do fator de potência com capacitores série

onde:

$S_C, P_C, Q_C, \cos \phi_C$ - potências aparente, ativa e reativa e fator de potência da carga;

$S'_C, P'_C, Q'_C, \cos \phi'_C$ - potências aparente, ativa e reativa e fator de potência do alimentador.

$$Q'_C = Q_C - Q_{CAP}$$

Observa-se, pela figura 3.6, como o capacitor em estudo pode contribuir na elevação do fator de potência do alimentador ao reduzir o valor da potência aparente de S_C para S'_C ($S'_C < S_C$).

3.2.4. REDUÇÃO DAS PERDAS NA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A operação de um sistema elétrico com elevado fator de potência e tensões estabilizadas o mais próximo possível da nominal, representam uma redução substancial da corrente necessária a carga. A corrente de carga em uma certa condição operacional é dada, em módulo:

$$I_C = \frac{S_C}{\sqrt{3} U_C} \quad (3.3)$$

Com a correção do fator de potência, a tensão de alimentação da carga naturalmente deverá se apresentar mais elevada após a compensação. Assim, tem-se:

$$I'_C = \frac{S'_C}{\sqrt{3} U'_C} \quad (3.4)$$

Para a redução das perdas na linha de distribuição, vem:

$$\Delta P_{\text{PERDAS}} = 3 \cdot R_L \cdot (I_C^2 - I'_C{}^2) \quad (3.5)$$

Pode-se estimar, pela equação anterior, que para uma redução de 10% da corrente tem-se, aproximadamente, 20% de economia em termos de redução de perda.

3.2.5. SUPORTE PARA PARTIDA DE GRANDES MOTORES

A partida de motores de grande porte, envolve uma corrente bastante elevada. Assim, a partir da utilização de compensadores série, a partida dessas máquinas é realizada sem a ocorrência de uma queda de tensão significativa ao longo do alimentador.

3.3. FATORES A SEREM CONSIDERADOS NO DIMENSIONAMENTO DOS CAPACITORES

Para um dimensionamento correto dos capacitores, devem ser considerados os seguintes fatores:

- a corrente de carga máxima do circuito, com uma margem adequada, a partir de estudos de previsão do carregamento futuro;
- a tensão desejada após a compensação;
- a reatância indutiva da linha, bem como dos transformadores alimentadores envolvidos.

Assim, a partir da corrente máxima escolhida, define-se a reatância capacitiva conveniente e a tensão nominal dos capacitores, preferencialmente dentro da padronização comercial disponível no mercado. O arranjo das unidades capacitivas escolhidas para a formação do banco de capacitores série, devem ser realizadas de maneira a obter a reatância capacitiva equivalente mais próxima possível daquela considerada ideal.

3.4. POSSÍVEIS PROBLEMAS NA APLICAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE

Apesar de ser uma solução simples e eficaz na correção dos problemas citados anteriormente, eventualmente, podem ocorrer distúrbios na operação do compensador série. Principalmente quando as necessidades do sistema elétrico exigem um elevado grau de compensação da linha. Uma acentuada redução da

reatância indutiva da linha, através da inserção de capacitores série, e a predominância da resistência da linha, pode implicar em problemas para a rede. Os principais efeitos negativos que por vezes acontecem, são:

- ferrorressonância;
- instabilidade de motores síncronos;
- auto-excitação em motores de indução.

Analisa-se a seguir esses distúrbios.

3.4.1. FERRORRESSONÂNCIA

3.4.1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Se a tensão que alimenta um transformador a vazio é aplicada no instante em que ocorrer a sua passagem por zero, ou próximo desse, uma corrente de magnetização elevada provavelmente irá circular. Isso acontece em virtude da tendência a uma elevação do fluxo no transformador no primeiro meio-ciclo da onda de tensão. Como o transformador nessas condições satura, sua reatância de magnetização alcança valores bastante reduzidos, implicando no surgimento de uma alta corrente por alguns ciclos, tornando depois a circular a corrente magnetizante normal de baixo valor.

No entanto, com a instalação de capacitores série no circuito, na situação de transformador a vazio ou levemente carregado, uma alta corrente pode circular em regime permanente. Seu valor pode atingir a corrente de plena carga, ou ainda amplitudes ainda mais elevadas. Essa corrente, assim como a tensão secundária do transformador, é composta basicamente de componentes em baixa frequência, e as suas formas apresentam-se bastante distorcidas.

3.4.1.2 - APRESENTAÇÃO DO FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA

Considere que a tensão é aplicada no ponto zero da onda. Durante o primeiro meio-ciclo, o fluxo no núcleo eleva-se de forma acentuada. Nesse instante o efeito do capacitor ainda não se faz presente, pois a corrente circulante possui baixos valores, e a queda de tensão nos terminais do equipamento é praticamente desprezível. No entanto, assim que se atinge a saturação do núcleo, ocorre uma grande elevação da corrente, que por sua vez provoca uma queda de tensão razoável nos terminais do capacitor série. Porém devido a redução da impedância total do circuito no primeiro meio-ciclo, a corrente inrush possui magnitudes maiores que aquelas que existiriam caso a compensação série não estivesse presente.

Além disso, como o fluxo tende a permanecer deslocado, este não alcançará valores elevados na direção negativa no segundo meio-ciclo. Assim sendo, a corrente de excitação permanece muito pequena para o intervalo seguinte. O capacitor atua como uma fonte de tensão adicional que tende, continuamente, a reduzir o fluxo. De forma semelhante como ocorrida no primeiro meio-ciclo, quando ele atuou na redução do seu crescimento. Dessa maneira, no segundo ciclo, o fluxo no transformador pode não crescer o suficiente para provocar a saturação, não ocorrendo assim a descarga do capacitor. Justamente por isso, a tensão ainda armazenada no compensador continua a provocar o decréscimo do fluxo. Esse processo continua até ocorrer a saturação do núcleo na direção negativa, que provocará a descarga do capacitor, e a conseqüente circulação de corrente elevada. Essa descarga pode acontecer de maneira parcial ou em degrau. Se esta é parcial, o fluxo alcançará um maior valor negativo no próximo ciclo, aplicando então uma carga contrária no capacitor e forçando a redução do deslocamento negativo. A partir disso, ocorre a elevação de um deslocamento positivo, completando o ciclo de operação anormal do alimentador.

Como a razão de decréscimo do deslocamento do fluxo é proporcional a tensão no capacitor, essas grandes

correntes magnetizantes dependem, fundamentalmente, do valor da tensão aplicada, bem como do instante em que ela começa a atuar.

Se a tensão é aumentada a um certo valor crítico, o circuito pode saturar a cada meio-ciclo, solicitando demasiadamente dos componentes do sistema. Medições realizadas em sistema contendo compensação série em linha suprindo transformador a vazio, são apresentadas na figura 3.7. Nela pode-se observar o fenômeno da ferrorressonância através das formas de onda da tensão e corrente no secundário do transformador, bem como no capacitor.

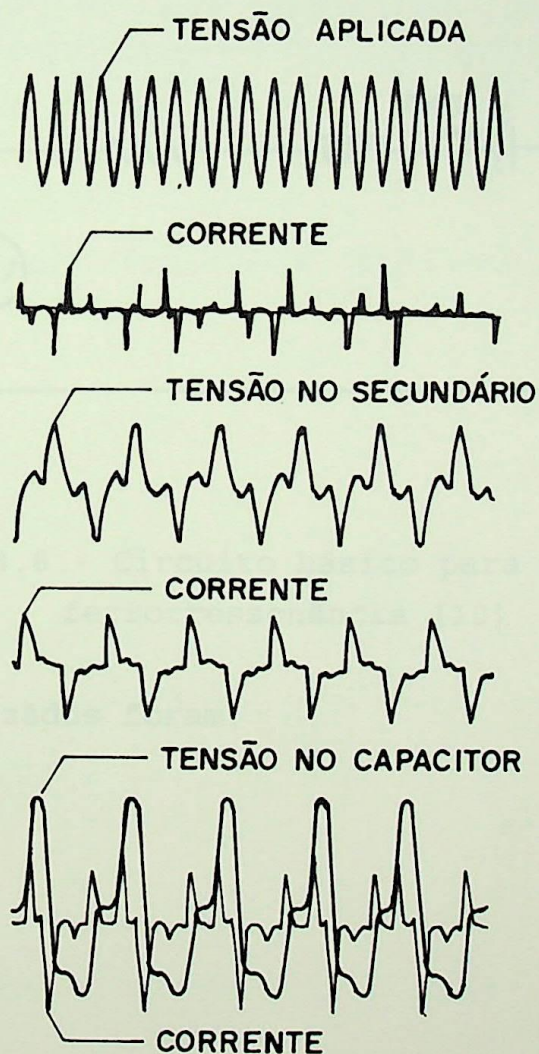


Figura 3.7 - Oscilogramas de correntes e tensões anormais quando o transformador é excitado por capacitor série [13].

A figura 3.8 apresenta o circuito básico para o estudo da ferorrressonância, enquanto na figura 3.9 são mostrados resultados de simulação [10]. São mostradas as formas de onda do fluxo no núcleo do transformador, da tensão nos terminais do capacitor e da corrente de excitação. Foram assumidos em todos os 3 casos energização ocorrendo no zero da onda de tensão, e valores distintos para a magnitude dessa tensão. Na modelagem do transformador utilizou-se curva de magnetização típica desse equipamento.

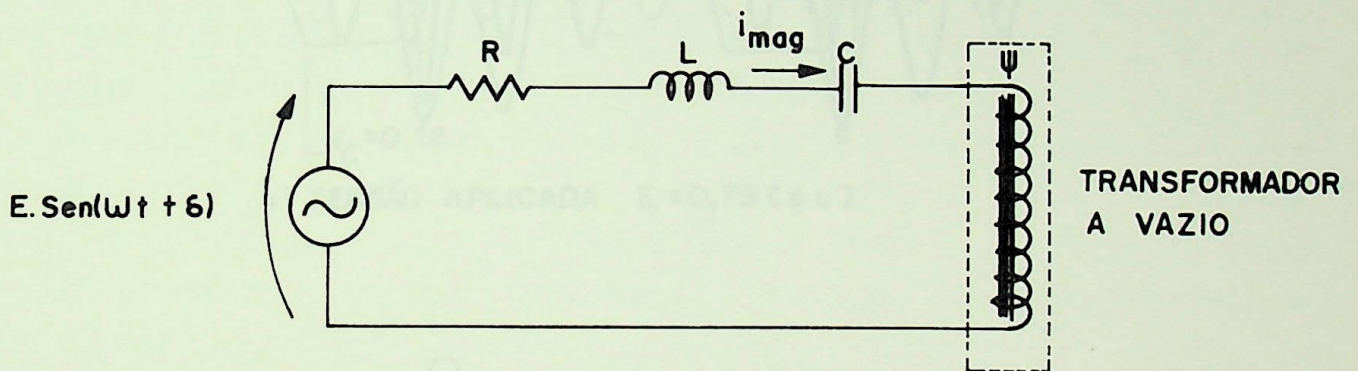


Figura 3.8 - Circuito básico para estudo da ferorrressonância [10]

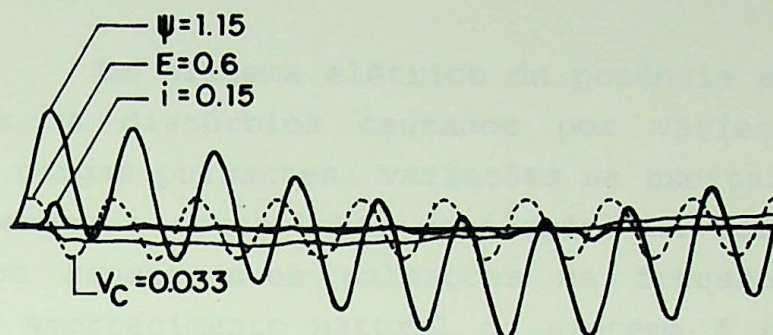
Os parâmetros utilizados foram:

$$R = 0,049 \text{ [pu]}$$

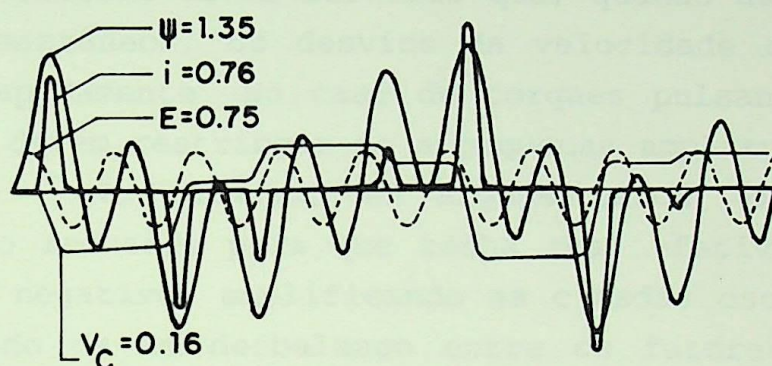
$$X_L = 0,197 \text{ [pu]}$$

$$X_C = 0,214 \text{ [pu]}$$

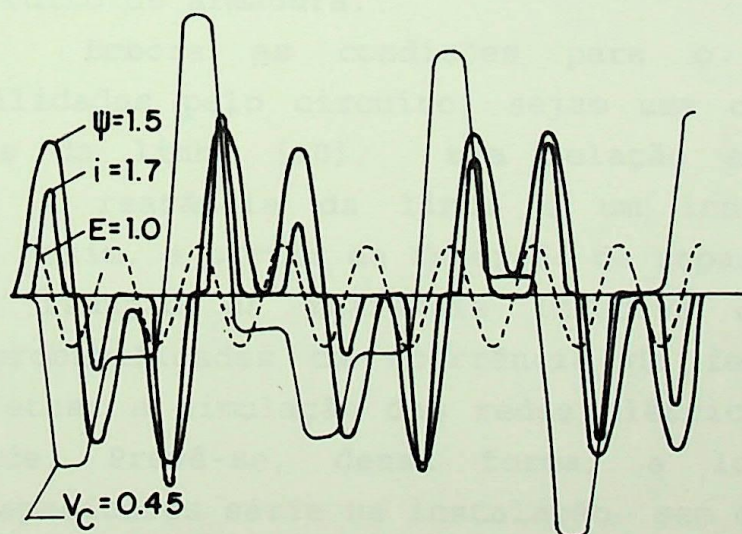
$$\delta = 0$$



a) TENSÃO APLICADA $E=0,6$ [pu]



b) TENSÃO APLICADA $E=0,75$ [pu]



c) TENSÃO DA FONTE $E=1,0$ [pu]

Figura 3.9 - Formas de onda do fluxo, tensão no capacitor e corrente magnetizante, com diferentes valores para a tensão de alimentação [10].

3.4.2. INSTABILIDADE DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Um sistema elétrico de potência está sujeito, a todo instante, a distúrbios causados por variações na carga, chaveamentos, cargas pulsantes, variações na excitação, etc. Essas perturbações tendem a estabelecer oscilações no rotor de máquinas síncronas, com consequentes pulsações na frequência e tensão. Entretanto, o amortecimento natural do sistema é suficiente para impedir oscilações severas na maioria das vezes. Assim, as constantes do sistema devem ser tais que, quando da ocorrência de distúrbios momentâneos, os desvios da velocidade do rotor devem desaparecer rapidamente. No caso de torques pulsantes contínuos, as oscilações devem restringir-se a pequenas amplitudes.

No entanto, em alguns casos, o amortecimento pode ser muito reduzido para que tenha real efetividade, ou pode até mesmo ser negativo, amplificando as citadas oscilações. Essas são o resultado de um desbalanço entre os fatores que produzem amortecimento real (resistência nos circuitos de rotores, alguns tipos de cargas, atritos mecânicos, etc.), e aqueles que introduzem amortecimentos negativos, isto é, as resistências de linha e do circuito de armadura.

Embora as condições para o estabelecimento dessas instabilidades pelo circuito, sejam uma certa combinação das constantes da linha [10], uma relação elevada entre a resistência e a reatância da linha é um indicativo de tal instabilidade. Assim, a partir da inserção de capacitores série, e a consequente redução da reatância indutiva do alimentador, aumentam as probabilidades da ocorrência do fenômeno. Logo é conveniente efetuar a simulação das redes elétricas em programas de estabilidade. Prevê-se, dessa forma, a localização mais adequada dos capacitores série na instalação, sem que estes venham a interferir na boa operação de motores e/ou geradores síncronos existentes no sistema elétrico.

3.4.3. AUTO-EXCITAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO

Sabe-se que uma máquina de indução pode operar como gerador, desde que a excitação seja suprida através de uma máquina síncrona, ou até mesmo por capacitores. Assim sendo, considere um motor de indução alimentado por uma linha de distribuição contendo um capacitor série. Para esse tipo de instalação, além das correntes fluindo devido a operação normal do motor, sob determinadas condições, esse pode atuar como um gerador de indução. Com isso, são geradas correntes de baixa frequência, limitadas apenas pela impedância do circuito de suprimento, e que podem alcançar valores relativamente elevados.

Essas correntes não manifestam-se apenas como surtos de corrente e tensão, mas também como fortes oscilações do rotor, causadas pelos torques pulsantes elevados que são produzidos. A figura 3.10 mostra um oscilograma da partida de motor de indução, em que pode ser observada a corrente de partida com auto-excitação em uma de suas fases.

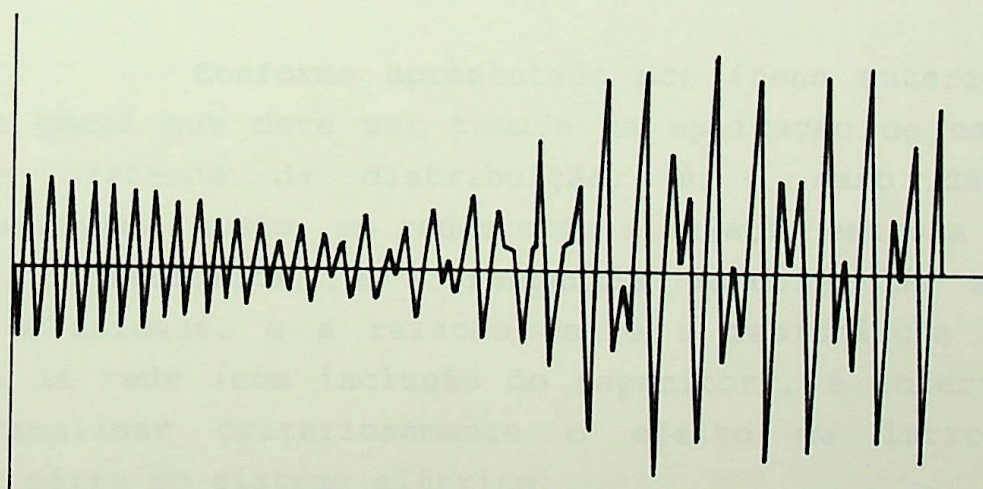


Figura 3.10 - Corrente de partida com auto-excitação em um motor de indução com capacitor série

Na figura 3.10 observa-se que o motor alcança a velocidade de regime de maneira normal. Contudo, após diversos ciclos, a corrente cresce para valores bem acima do normal, em que são verificadas várias frequências superpostas. Isso acontece em virtude da corrente ser limitada apenas pela saturação, e esta cresce até que as constantes do circuito mudem para um determinado valor que não permita a auto-excitação.

A ocorrência desse fenômeno também está ligado ao aumento do grau de compensação da linha. Assim, para baixos valores da reatância capacitiva, em relação a indutância equivalente do sistema, a probabilidade de ocorrência do fenômeno é praticamente nula.

Em [9] e [11] tem-se a relação que deverá existir entre a resistência da linha e as reatâncias indutivas e capacitiva série para ocorrer a auto-excitação, considerando-se carga composta unicamente por motores de indução. Pode-se observar que se a reatância capacitiva do capacitor série for menor que a metade da reatância de curto-circuito do sistema, a auto-excitação não ocorrerá em motores de indução normalmente carregados.

3.4.4. ASPECTOS DE ORDEM PRÁTICA QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NA UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE

Conforme apresentado nos itens anteriores, uma precaução geral que deve ser tomada na aplicação de capacitores série em sistemas de distribuição, é o caso das linhas sobrecompensadas. Assim, em redes onde a relação entre a reatância capacitiva introduzida, e a reatância indutiva do sistema é superior a unidade, e a relação entre a resistência e a nova reatância da rede (com inclusão do capacitor), é inferior a um, deve-se analisar criteriosamente o efeito da introdução do capacitor série no sistema elétrico.

Para evitar a ocorrência de ferrorressonância, os capacitores devem ser curto-circuitados e permanecerem dessa maneira alguns segundos, quando por ocasião da energização de transformadores. Além disso, eles precisam estar localizados de

maneira que a tensão nas barras a jusante do capacitor sejam menores que 110% da tensão nominal do sistema. Evita-se assim ferroressonância nos transformadores que estejam conectados nesse ponto do circuito [14].

No processo de partida de motores de indução, ou mesmo partida assíncrona de motores síncronos, pode ocorrer auto-excitação nos casos relacionados a seguir:

- a) Motores que partem sem carga no eixo, e com potência nominal maior que 5% da potência prevista em termos de capacitores série e capacitância da linha e,
- b) Motores que partem carregados, cuja potência nominal é maior que 20% da potência média da carga localizada a jusante do capacitor série.

OBS: Nestes casos o tempo de partida do motor é longo (maior que 5 segundos) devido a alta inércia, ou ainda ao elevado torque mecânico da carga [14].

Também devem haver precauções no caso da existência de motores de indução e motores síncronos, que produzem torques pulsantes e podem originar amplificação das flutuações da tensão. Assim, quando da utilização de motores acionando cargas variáveis, tipo compressores, bombas de sucção, grupos geradores-motores diesel, etc., esses não devem ser maiores que 5% da potência dos capacitores série e da linha.

3.5. PROJETO E DESEMPENHO DOS MODERNOS COMPENSADORES SÉRIE

A instalação de um compensador série é extremamente simples e consiste basicamente de chaves, proteção contra sobretensões, além naturalmente do próprio banco de capacitores série. O esquema fundamental do circuito do compensador é mostrada na figura 3.11. Para o processo de conexão/desconexão dos capacitores, bem como para a energização/desenergização da linha, deve ser seguida algumas

seqüências de operação das chaves para que se tenha uma operação segura do sistema. Assim, antes da energização da linha as seccionadoras (3) (operadas manualmente), devem estar fechadas para a inserção dos compensadores. Nessa operação, a chave bypass (6) sempre deve estar na posição fechada.

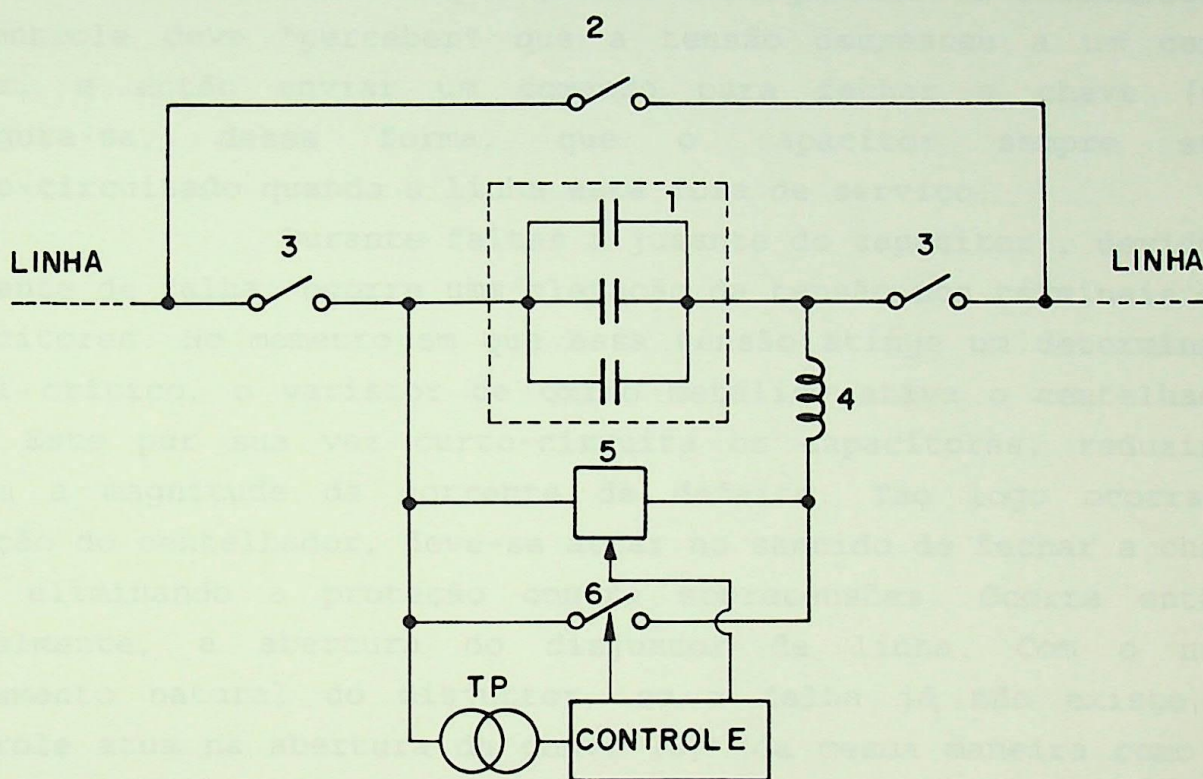


Figura 3.11 - Diagrama esquemático de uma das fases do compensador do compensador série

Na figura, tem-se:

- 1 - banco de capacitores série;
- 2 - chave seccionadora BYPASS (deve operar sob carga);
- 3 - chaves seccionadoras de isolamento do equipamento;
- 4 - reator para limitação de corrente;
- 5 - centelhador ativado através de varistor de óxido metálico;
- 6 - chave BYPASS.

No momento da energização, o mecanismo de controle deve atrasar a abertura da chave (6), em tempo que permita a inserção dos capacitores, e prevenir a ferrorressonância devido a energização da linha. Concluída a inserção do equipamento no sistema elétrico, a chave bypass deve estar pronta para qualquer operação de fechamento, decorrido um tempo adequado após o comando de ligar.

Para a operação de desligamento do alimentador, o controle deve "perceber" que a tensão decresceu a um certo valor, e então enviar um comando para fechar a chave (6). Assegura-se, dessa forma, que o capacitor sempre seja curto-circuitado quando a linha está fora de serviço.

Durante faltas a jusante do capacitor, devido a corrente de falha, ocorre uma elevação da tensão nos terminais dos capacitores. No momento em que essa tensão atinge um determinado nível crítico, o varistor de óxido metálico ativa o centelhador (5). Este por sua vez curto-circuita os capacitores, reduzindo assim a magnitude da corrente de defeito. Tão logo ocorra a atuação do centelhador, deve-se atuar no sentido de fechar a chave (6), eliminando a proteção contra sobretensões. Ocorre então, normalmente, a abertura do disjuntor de linha. Com o novo fechamento natural do disjuntor, se a falha já não existe, o controle atua na abertura da chave (6) (da mesma maneira como na energização), para a inserção dos bancos. Caso contrário, o disjuntor novamente atuará, e a chave (6) não terá tempo de abrir. Com isso, os capacitores permanecerão desconectados do sistema na saída do ramal.

Ainda com relação ao projeto do equipamento, no caso de sistemas com facilidade de auto-excitação na partida de grandes motores, é importante prever algum tipo de detector de ressonância. O sinal de saída, quando gerado, deve acionar um circuito de amortecimento externo. Obviamente, a opção de curto-circuito dos capacitores não é utilizada nesse caso, devido ao suporte de reativos fornecidos pelo compensador.

Um caso típico de utilização de capacitores série pela indústria encontra-se em [13]. Trata-se de um ramal de distribuição em 66,0 [KV] pertencente a DUQUESNE LIGHT COMPANY, PITTSBURGH, USA, que alimenta fornos a arco, grandes motores elétricos, bem como a cidade de Midland. Escolheu-se para a compensação das quedas de tensão que ocorrem nesse ramal, capacitores série que perfazem 10 [MVar] de potência.

Em [13], pode-se verificar o desempenho do equipamento frente as variações de consumo das referidas cargas, e em condições reais de serviço. Verifica-se também as possibilidades de ocorrências dos problemas descritos anteriormente. As soluções adotadas para a eliminação dos problemas advindos desta tecnologia foi a utilização de uma reatância capacitiva de 3,59 [Ω], contra 11,49 [Ω] para a reatância indutiva da linha, bem como um sistema de chaveamento para eliminar os capacitores quando da partida dos grandes motores existentes.

3.6. CONCLUSÕES

Os capacitores série mostram-se extremamente eficazes no balanceamento e melhoria na regulação da tensão em ramais de distribuição, suprindo cargas problemáticas. Outros benefícios podem ser trazidos aos sistemas elétricos. Isto é, melhoria no fator de potência, atenuação do efeito flicker, suporte para partida de grandes motores e redução das perdas na transmissão.

Em linhas de distribuição em que se deseja um grau de compensação inferior a 50% da reatância indutiva do alimentador, pode-se utilizar normalmente o capacitor série, sem que sejam esperados efeitos negativos na operação do sistema.

Com a elevação do nível de compensação, apesar de ainda continuar sendo uma forma eficiente e relativamente barata para controle da tensão, investigações mais cuidadosas são necessárias. Estudos de estabilidade são necessários em alguns

casos, com o objetivo de ser mantido o sincronismo dos motores do sistema elétrico. A auto-excitação na partida de motores de indução, e motores síncronos com partida a indução, também são possíveis nesses casos. Resistores conectados em paralelo ao capacitor podem reduzir, ou até mesmo impedir esse fenômeno. As sobrecorrentes e sobretensões advindas da energização de linhas com transformadores a vazio, também podem ser ampliadas na presença dos capacitores série. Nesse caso, as resistências designadas para a solução da auto-excitação, podem ser utilizadas quando do período de energização da linha envolvida.

Numa análise efetuada sobre uma instalação real contendo capacitores série, observou-se através de resultados de medições, a habilidade natural desse equipamento na redução da instabilidade e regulação da tensão. Além disso, foram apresentadas as diretrizes básicas utilizadas para prever-se os distúrbios citados anteriormente, bem como curvas que podem determinar os valores mais adequados da resistência shunt para o amortecimento das ressonâncias.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS NO PROGRAMA DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UBC-EFEI

4.1. INTRODUÇÃO

Com a finalidade de analisar o desempenho dos compensadores estáticos analisados nos capítulos anteriores, apresenta-se a seguir os resultados obtidos através das simulações desses equipamentos no Programa de Transitórios Eletromagnéticos **UBC-EFEI**.

Modelou-se, um compensador série instalado em linha de distribuição, bem como reatores controlados a tiristores (RCT) com capacitores fixos. Para ambas instalações a carga se apresenta desequilibrada e indutiva.

No caso do compensador tipo RCT, modelou-se também um sistema de controle para variação automática dos ângulos de disparo dos semicondutores que compõem tal equipamento. Dessa forma, pode ser efetuado uma correção dinâmica da carga.

A partir dos modelos implementados, é possível analisar a rapidez e eficiência, em regime permanente, desses equipamentos frente as oscilações da carga. Possibilita também a elaboração de modelos mais completos dos circuitos de potência, visando a análise de transitórios.

4.2. O PROGRAMA UBC-EFEI

O programa utilizado nas simulações que serão apresentadas é o Programa para Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos versão "**UBC-EFEI**", desenvolvido pelo Dr. Hermann Wilhelm Dommel a partir do existente na The University of British Columbia.

Esse programa é uma versão reduzida do Electromagnetic Transients Program (EMTP), e está dotado, ao contrário desse último, de uma rotina de supressão das oscilações numéricas, fundamental em simulações de sistemas que contenham semicondutores de potência. Além disso, entre os programas de análise de redes disponíveis é o mais rápido, preciso, e confiável.

O programa **UBC-EFEI** pode simular o comportamento transitório, e de regime permanente, de sistemas de energia elétrica e de quaisquer tipos de redes elétricas com até 380 nós e 200 ramos. As características principais do programa incluem modelagem de:

- Elementos R, L, C concentrados;
- Circuitos PI (Π) multifásicos;
- Linhas de transmissão de parâmetros distribuídos com parâmetros constantes, transpostas e não-transpostas;
- Modelos de supressores de surtos e resistências não-lineares, incluindo pára-raios tipo óxido metálico (ZnO);
- Indutâncias não-lineares;
- Chaves com diversos critérios de operação para simular disjuntores com sequências múltiplas de fechamento-abertura, centelhadores, diodos, tiristores e outras modificações do estado da rede;
- Fontes de tensão e corrente em complemento às funções matemáticas padrão (senóides, funções de surto, degraus, rampas), pode-se especificar fontes ponto a ponto como função do tempo;
- Máquinas síncronas com enrolamentos de armadura, campo e amortecedor. O modelo também inclui uma representação de sistema eixo-massa para a simulação de oscilações torsionais;
- Possui subrotinas de acesso às variáveis do programa principal, possibilitando o desenvolvimento de novos modelos de equipamentos elétricos.

Além disso, não possui problemas relativos a oscilação numérica, a qual é analisada de modo simplificado no

item a seguir.

4.2.1. SUPRESSÃO DAS OSCILAÇÕES NUMÉRICAS

O programa EMTP, normalmente utilizado por diversas empresas, apesar de também fazer uso do algoritmo proposto por H.W.Dommel [15], na ocorrência de chaveamentos na rede, pode conduzir a oscilação numérica [16]. Esse problema agrava-se acentuadamente em simulações de pontes conversoras, devido aos diversos chaveamentos das válvulas que ocorrem a cada ciclo, prejudicando os resultados das simulações.

Basicamente, pode-se dizer que as oscilações numéricas são oriundas da descontinuidade da corrente, para os ramos indutivos (ou da tensão para os ramos capacitivos) quando da mudança brusca de seu estado operacional.

Seja o circuito da figura 4.1, a seguir, envolvendo um ramo puramente indutivo.

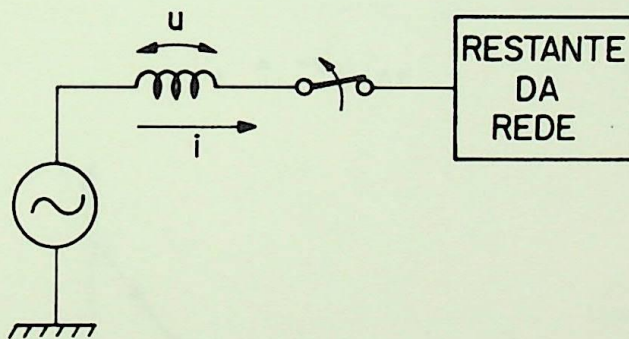


Figura 4.1 - Rede analisada para interrupção da corrente

A equação para a indutância do circuito apresentado na figura 4.1, é dado por:

$$u = L \frac{di}{dt}$$

Reescrevendo a equação anterior para uma forma mais conveniente, vem:

$$i_t = i_{t-\Delta t} + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t u(x) \cdot dx \quad (4.1)$$

Como o programa "UBC-EFEI", da mesma maneira que o EMTP utilizam o método trapezoidal de integração, deve-se adaptar a equação (4.1) a esse processo matemático. Assim, conforme [15] a solução de (4.1) é dada por:

$$i_t = i_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2L} (u_t - u_{t-\Delta t}) \quad (4.2)$$

Pode-se observar pela figura 4.2, que para o primeiro intervalo de tempo, ao ocorrer a interrupção da corrente no instante t_1 (suposta ter acontecido exatamente na passagem por zero), o valor de $u_{t-\Delta t}$ é correto. Entretanto, no segundo intervalo de tempo (instante t_2), a corrente i_t continuará com valor zero, em virtude da chave ter permanecido aberta. Dessa forma, tanto i_t , quanto $i_{t-\Delta t}$, serão nulas. Assim, a tensão após a abertura da chave será dada por:

$$u_t = -u_{t-\Delta t} \quad (4.3)$$

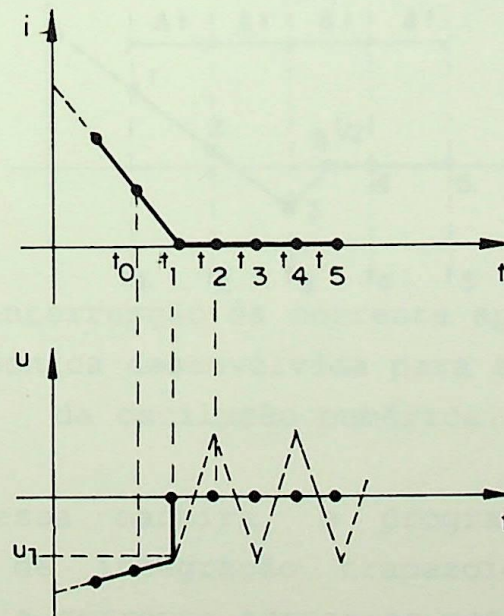


Figura 4.2 - Oscilação da tensão após abertura da chave

A equação (4.3) sustenta-se pelos intervalos de tempo subsequentes, resultando na citada oscilação numérica em torno da solução ($u = 0$).

Na realidade, o problema é originado pelas condições iniciais incorretas na integração de corrente do instante t_1 para o instante t_2 , pois $u_{t-\Delta t} = 0$ deveria ser utilizado como valor para a tensão assim que ocorresse a descontinuidade provocada pelo chaveamento. Em virtude da dificuldade na obtenção desse valor, em programas de transitórios baseados em equações nodais, J.R. Marti e Jimming Lin [17] propuseram uma alteração empregando-se o método de Euler modificado, ao ocorrer chaveamentos na corrente. O método proposto é baseado em variáveis de estado, e altera a equação (4.1) para uma nova formulação que não contém o valor de pré-abertura $u_{t-\Delta t}$. Assim,

$$u_t = L \frac{i_t - i_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (4.4)$$

A figura 4.3 mostra como fica a corrente $i(t)$, a partir dessas considerações, no programa em questão.

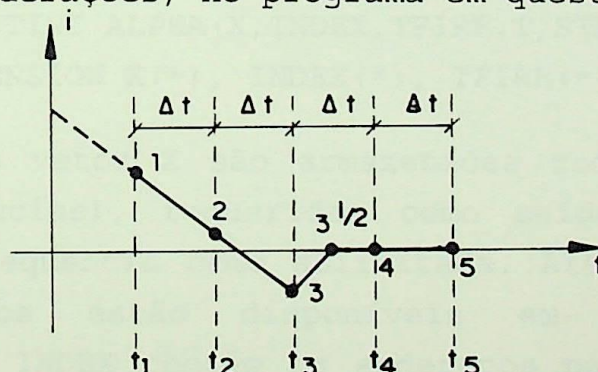


Figura 4.3 - Interrupção da corrente após a utilização da técnica desenvolvida para supressão da oscilação numérica.

Dessa maneira, o programa **UBC-EFEI** utiliza, então, do método de integração trapezoidal até o passo de integração seguinte a corrente tornar-se negativa (instante t_3). A partir desse instante efetua-se a mudança na configuração da rede para o novo estado operacional da chave (aberta, no caso

presente). Reduz-se, a seguir, o passo de integração para $\Delta t/2$, resolvendo o sistema utilizando-se passos de integração de tamanho $\Delta t/2$, nos instantes $3 \frac{1}{2}$ e 4 através de Euler modificado, retornando então ao método trapezoidal convencional.

4.2.2. A SUBROTINA ALPHA

O Programa **UBC-EFEI** possui diversas possibilidades do usuário poder implementar seus próprios modelos de equipamentos elétricos. Uma dessas alternativas é a elaboração de rotinas de controle dos ângulos de ignição de tiristores, realizadas a partir da subrotina ALPHA. Além disso, ela permite o acesso às variáveis de saída do programa, tornando relativamente simples, efetuar as modificações que servirão de base para atuação do sistema de controle da ponte conversora.

Os parâmetros de passagem do programa principal para a subrotina em questão, deve ser feito usando-se as duas linhas de comando da instrução FORTRAN obrigatórias, relacionadas a seguir.

```
SUBROUTINE ALPHA(X, INDEX, TFIRE, T, STEP)
  DIMENSION X(*), INDEX(*), TFIRE(*)
```

No vetor X são armazenadas todas as tensões e correntes (ou potências), requeridas como saída no arquivo de dados, e na mesma sequência como solicitada. Além disso, os seus valores instantaneos estão disponíveis em cada passo de integração. O vetor INDEX contém os endereços para alteração dos ângulos de disparo, sendo que esses estão armazenados no vetor TFIRE.

Para a alteração do tempo de disparo (em segundos) dos semicondutores, com a finalidade de incrementar um ganho, deve-se utilizar os comandos abaixo:

```
I = INDEX(K)
TFIRE(I) = TFIRE(I) + GANHO
```

Quando $I=0$ (informação vinda do arquivo de entrada), significa que o ângulo do tiristor não é controlado. Aqueles que possuem número de identificação no cartão de dados, são incrementados de um certo GANHO em segundos, sendo então adiantados de um ciclo.

O passo de integração (DELTA) é normalmente fixo (informação vinda do cartão de dados), exceto quando a interpolação é usada para conseguir o cruzamento por zero ("zero crossing") da corrente. Nesse caso, é usado o passo STEP, assim como no instante imediatamente posterior. A partir daí, o programa volta a utilizar o valor de DELTAT para o passo de integração .

No caso de haver a necessidade da obtenção de informações adicionais, pode-se recorrer à leitura do arquivo 2, o qual possui os seguintes comandos:

```
REWIND 2
READ(2) DELTAT, PERIOD, LX, LINDEX, LTFIRE, NNODE, NBRNCH, NCURR
READ(2) (FNODE(J), J=1, NNODE), (PAIR(J), J=1, (NBRNCH+NCURR))
```

Onde:

- DELTAT - Passo de tempo fixo (em segundos), que é normalmente usado;
- PERIOD - Período (em segundos) da primeira fonte senoidal do arquivo de entrada (assumindo ser a frequência industrial de fornecimento, e é necessário para a conversão de ângulos para tempo);
- LX - Dimensão do vetor de saída X;
- LINDEX - Dimensão do vetor INDEX (máximo número de chaves permitida = 51);
- LTFIRE - Dimensão do vetor TFIRE (número real de chaves estáticas controladas);
- NNODE - Número de tensões nodais (primeiro dado de entrada no vetor X);
- NBRNCH - Número de tensões de ramo (próximo dado de entrada do vetor X):

- NCURR - Número de correntes, ou potências (último dado de entrada do vetor X);
- FNODE - Contém os nomes dos nós das tensões nodais;
- PAIR - Contém os pares dos nomes de nós para as tensões e correntes de ramo.

Como informação adicional, destaca-se que quando da utilização do arquivo 2 do programa principal, deve-se usar a declaração DIMENSION para as variáveis FNODE e PAIR.

4.3. SIMULAÇÕES DE RCT/CAPACITORES FIXOS COMPENSANDO CARGA DESEQUILIBRADA

Com a finalidade de verificar a teoria desenvolvida no Capítulo 2 desse trabalho (desempenho em regime permanente), modelou-se no programa **UBC-EFEI** um sistema elétrico de potência simplificado, alimentando um sistema com um carregamento desbalanceado e altamente indutivo. Um compensador estático do tipo RCT/capacitores fixos é incumbido de fazer com que a carga apresente-se para o sistema de suprimento de energia, com fator de potência próximo da unidade além, naturalmente, de tornar a potência média fornecida à carga, bastante equilibrada.

4.3.1. MODELAGEM DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

O diagrama unifilar básico do sistema elétrico em análise utilizado para esta simulação no programa **UBC-EFEI**, é apresentado na figura 4.4.

O sistema de suprimento de energia foi considerado com potência de curto-circuito de 263 [MVA], e relação $X/R = 8,0$ (vista da barra PAC na figura 4.4).

Dessa forma, considerou-se as fontes de tensão atrás da resistência e reatância da rede, modeladas através de parâmetros concentrados (impedância da rede e transformador da indústria).

A carga desequilibrada suprida pelo sistema, e corrigida pelo compensador estático, está conectada em delta, e suas potências na tensão nominal (13,8 KV), são:

$$\text{- Fases A e B} \begin{cases} P = 8.40 \text{ [MW]} \\ Q = 7.00 \text{ [MVar]} \text{ indutivo} \\ \text{FP} = 0.77 \end{cases}$$

$$\text{- Fases B e C} \begin{cases} P = 6.70 \text{ [MW]} \\ Q = 5.80 \text{ [MVar]} \text{ indutivo} \\ \text{FP} = 0.76 \end{cases}$$

$$\text{- Fases A e C} \begin{cases} P = 9.60 \text{ [MW]} \\ Q = 5.00 \text{ [MVar]} \text{ indutivo} \\ \text{FP} = 0.89 \end{cases}$$

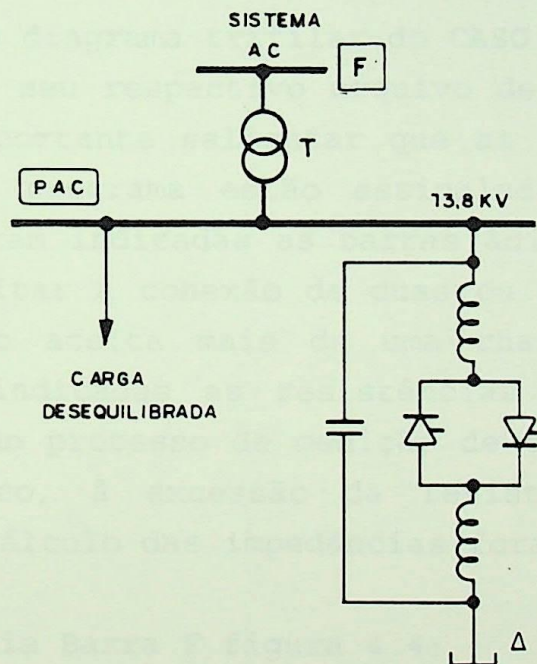


Figura 4.4 - Diagrama unifilar do sistema em análise

A carga foi representada, como sendo de impedâncias constantes, e definidas para as tensões nominais, considerando-se os consumos citados anteriormente. O fator de potência média para a carga trifásica obtido nesta situação foi de

0.81. Também as correntes se apresentaram desequilibradas, em função do carregamento desigual entre as fases.

No que se refere a modelagem do compensador estático, não houve a necessidade da sua representação de maneira detalhada, visto não ser esse o objetivo do presente trabalho. No entanto, destaca-se, por exemplo, que os circuitos RC de proteção dos semicondutores (snubber), podem facilmente serem representados, partindo-se do modelo aqui utilizado.

O RCT/capacitor fixo para correção está conectado em delta, e foi definido para cada ramo a potência reativa de compensação de:

- $Q_{\text{capacitor}} = 14.0$ [MVar]
- $Q_{\text{reator}} = 21.7$ [MVar]

O diagrama trifilar do CASO 1 (BASE), é mostrado na figura 4.5, e o seu respectivo arquivo de dados na tabela 4.1 (ítem 4.3.4). É importante salientar que as colunas relativas ao vetor de saída do programa estão assinaladas nessa tabela. Na figura 4.5, não foram indicadas as barras adicionais criadas, com a finalidade de evitar a conexão de duas ou mais chaves no mesmo nó (o programa não aceita mais de uma chave na mesma barra). Também não foram indicadas as resistências adicionais de baixo valor, utilizadas no processo de medição de corrente ("SHUNT") do compensador estático, à excessão da resistência R_s . Os dados utilizados para o cálculo das impedâncias foram os seguintes:

- Sistema de potência Barra F figura 4.4:

- . $S_{CC} = 500$ [MVA];
- . $U = 13.8$ [KV];
- . $X/R = 10.0$.

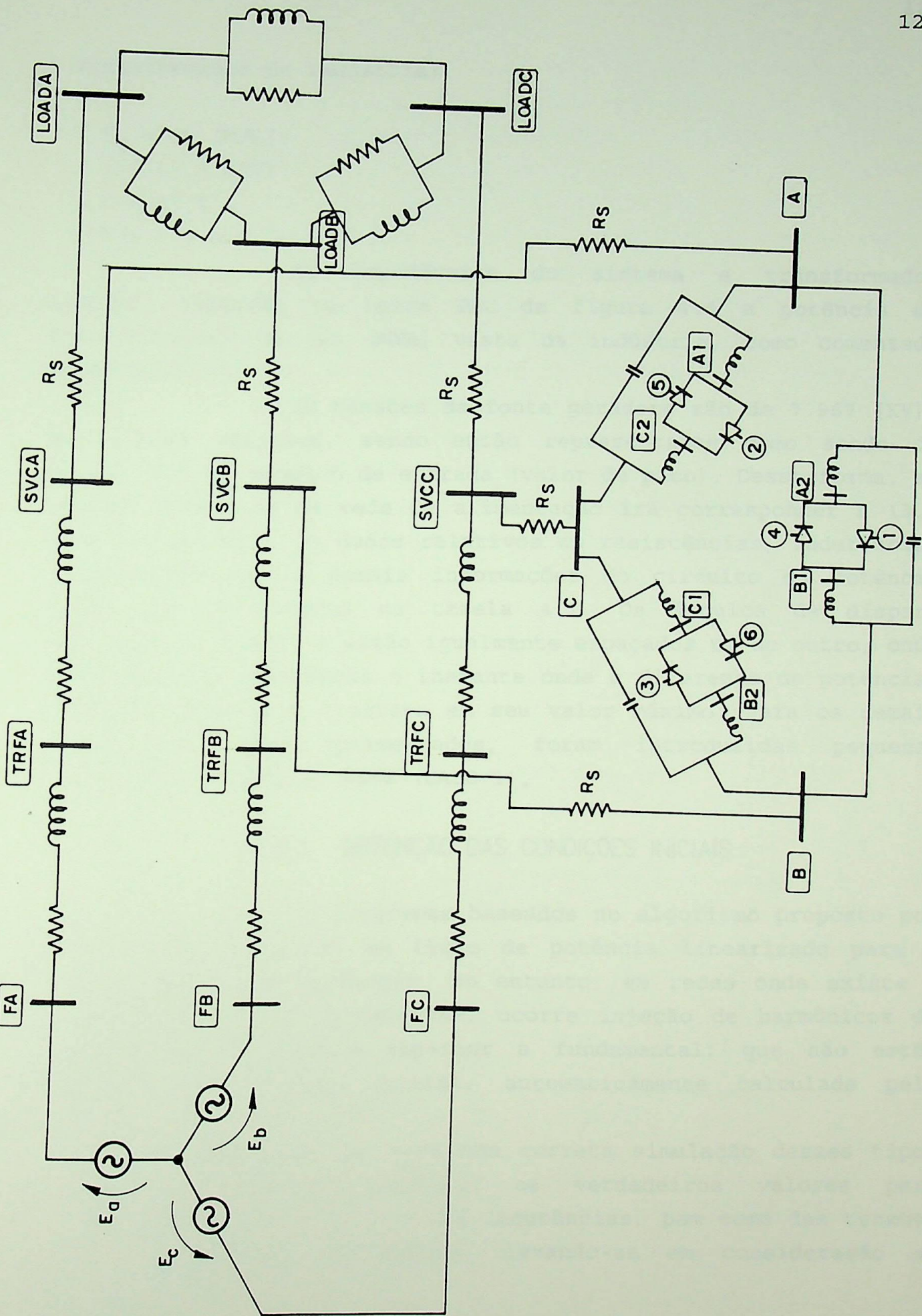


Figura 4.5 - Diagrama trifilar do circuito de potência modelado

- Transformador da indústria:

- . $S_N = 60$ [MVA];
- . 138/13.8 [KV];
- . $Z = 10$ %
- . $X/R = 6.0$.

As impedâncias do sistema e transformador somadas, formarão na barra PAC da figura 4.4 a potência de curto-circuito de 263 [MVA] vista da indústria, como comentada anteriormente.

As tensões da fonte geradora são de 7.967 [KV], em valores eficazes, sendo então representadas como sendo de 11,268 [KV] no arquivo de entrada (valor de pico). Dessa forma, as tensões fase-fase da rede de alimentação irá corresponder a 13.8 [KV] (valor RMS). Os dados relativos as resistências, indutâncias e capacitâncias, e demais informações do circuito de potência podem ser verificados na tabela 4.1. Os ângulos de disparo iniciais são fixos, e estão igualmente espaçados um do outro, onde tomou-se para referência o instante onde a diferença de potencial entre as fases A e B estava em seu valor máximo. Para os demais casos que serão apresentados, foram introduzidas pequenas alterações no arquivo BASE (CASO 1),

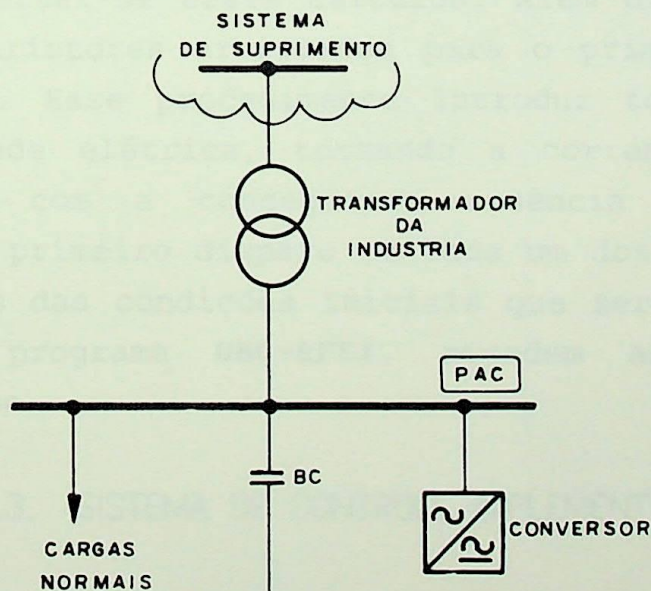
4.3.2. OBTENÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS

Os programas baseados no algoritmo proposto por Dommel [15], executam um fluxo de potência linearizado para a inicialização das variáveis. No entanto, em redes onde existe a presença de pontes conversoras, ocorre injeção de harmônicos de corrente de frequência superior a fundamental, que não estão previstos na solução inicial, automaticamente calculada pelo programa.

Dessa maneira, para uma correta simulação desses tipos de sistema, deve-se calcular os verdadeiros valores para inicialização das correntes nas indutâncias, bem como das tensões nas capacitâncias. Obviamente, levando-se em consideração as

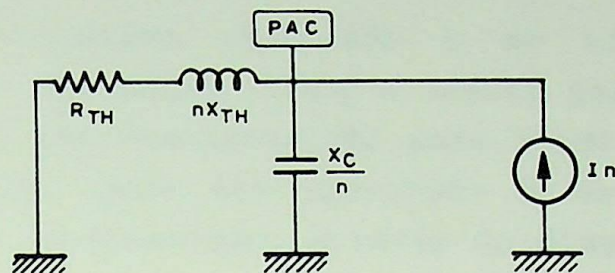
amplitudes e os ângulos de fase dos harmônicos de corrente existentes. Caso contrário, no primeiro meio-ciclo, os resultados encontrados não corresponderão a realidade de operação do sistema.

Para calcular-se, então, as verdadeiras condições iniciais das variáveis de interesse, deve-se injetar cada harmônico de corrente presente, no ponto de instalação do equipamento conversor. Obtém-se, dessa maneira, a tensão nos terminais das capacitâncias, e corrente nas indutâncias, para cada um dos componentes harmônicos existentes, tornando-se simples obter os valores eficazes totais. Naturalmente, para essas frequências superiores à fundamental, são curto-circuitadas as fontes de tensão. A figura 4.6 ilustra o processo. Na figura 4.6(b) R_{TH} e X_{TH} representam, respectivamente, a resistência e a reatância de Thevenin, naturalmente vistas da barra PAC. Maiores detalhes acerca de cálculo das condições iniciais podem ser encontradas em [16].



(a) Sistema exemplo

Figura 4.6 - Sistema para cálculo das condições iniciais
(continua na página seguinte)



(b) Circuito equivalente para o harmônico de ordem n

Figura 4.6 - Sistema para cálculo das condições iniciais (continuação)

Para evitar o cálculo manual em todas as frequências, pode-se simular no programa UBC o regime permanente do circuito em cada frequência para os harmônicos existentes, ou simular durante um intervalo de tempo até atingir condição de regime desejada para o ângulo de disparo fixo. Entretanto, como o objetivo do trabalho é a verificação do desempenho de um sistema de controle para o compensador estático shunt, não houve a necessidade de efetuar-se esses cálculos. Além disso, os ângulos de ignição dos tiristores arbitrados para o primeiro meio ciclo são de zero grau. Esse procedimento introduz todo o reator do compensador na rede elétrica, tornando a corrente praticamente senoidal. Assim, com a conseqüente ausência de componentes harmônicos para o primeiro disparo de cada um dos semicondutores, os valores obtidos das condições iniciais que serão, normalmente, calculadas pelo programa UBC-EFEI, atendem as condições do problema em análise.

4.3.3. SISTEMA DE CONTROLE IMPLEMENTADO

Como comentado anteriormente, o usuário deve utilizar-se, no programa UBC-EFEI, da subrotina ALPHA quando os objetivos da simulação for controlar semicondutores. Assim, modelou-se um sistema de controle para o compensador, com a

finalidade de corrigir o desequilíbrio e o fator de potência da carga.

O sistema elaborado é do tipo "controlador individual de fase", em malha ("loop") aberta para a correção da carga, e uma malha com realimentação para ajuste da tensão. Na figura 4.7 a seguir, pode ser observado o esquema básico do sistema de controle implementado, através do diagrama unifilar do sistema elétrico.

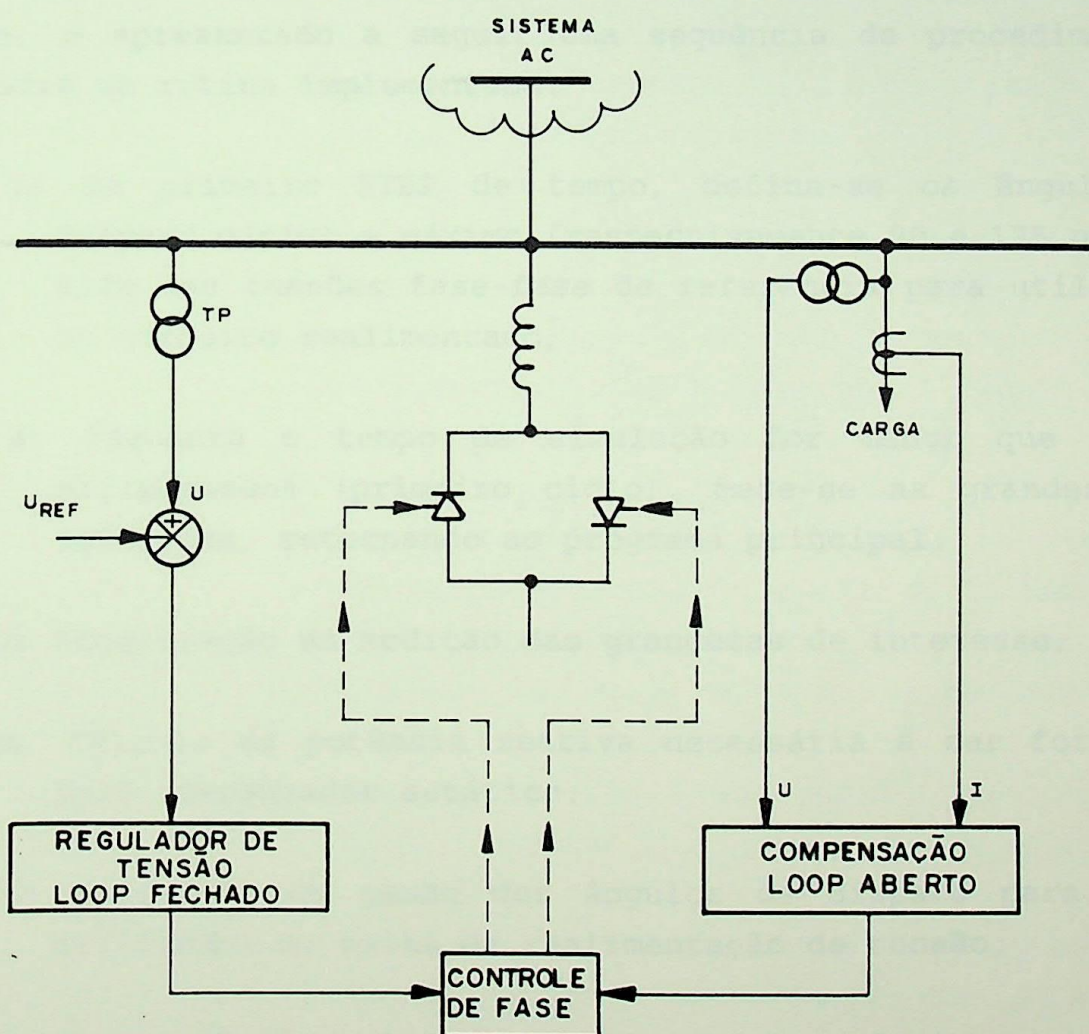


Figura 4.7 - Esquema básico de controle do C.E. simulado

Na concepção do sistema em questão, previu-se o bloqueio do ângulo de disparo mínimo, a semelhança de sistemas reais. De forma análoga, estabeleceu-se também bloqueio para o ângulo de ignição máximo, garantindo assim não haver possibilidades de falhas de comutação entre os semicondutores. Além dessas similaridades com sistemas de controle reais, acrescentou-se ainda a característica de controle de ângulos de disparo do tipo equidistante para os tiristores ("Phase Locked Oscillators" [4]). Essa técnica de disparo independe da tensão AC de alimentação e seus eventuais desequilíbrios, e se caracteriza por produzir pulsos de gatilho igualmente espaçados de 180 graus, em acordo com a necessidade do controle individual de fase.

Com a finalidade de facilitar a compreensão do sistema, é apresentado a seguir uma sequência de procedimentos utilizados na rotina implementada.

- PASSO 1:** No primeiro STEP de tempo, define-se os ângulos de disparo mínimo e máximo (respectivamente 90 e 175 graus), além das tensões fase-fase de referência para utilização no circuito realimentado;
- PASSO 2:** Enquanto o tempo de simulação for menor que 16,667 milisegundos (primeiro ciclo), mede-se as grandezas de interesse, retornando ao programa principal;
- PASSO 3:** Atualização da medição das grandezas de interesse;
- PASSO 4:** Cálculo da potência reativa necessária a ser fornecida pelo compensador estático;
- PASSO 5:** Definição do ganho dos ângulos de disparo para serem utilizados na malha de realimentação de tensão;
- PASSO 6:** Acumulação de resultados (em cada passo de integração) no tempo, para a plotagem da corrente compensada eficaz (RMS), da tensão eficaz (RMS) na barra de interesse, além

do fator de potência de cada fase e da instalação;

PASSO 7: Verificação do instante a partir do qual os tiristores podem receber pulsos de disparo;

PASSO 7.1: Na primeira condição de disparo de um dos tiristores, calcula-se o ângulo de ignição apropriado para a compensação da carga, para o ramo correspondente do compensador estático. Utiliza-se, então, dos valores obtidos no passo 3 para o cálculo da corrente compensadora, e o tempo de disparo do tiristor em questão;

PASSO 7.2: Comparação da tensão medida atualizada com o valor adotado como referência:

- Se superior, subtrai-se o ganho fixado no passo 5 do ângulo calculado no passo 7.1 (tanto o tiristor pronto para disparar quanto aquele em operação de fase);
- Se inferior, soma-se o ganho fixado no passo 5 ao ângulo calculado no 7.1;

PASSO 7.3: Comparação do ângulo final obtido no passo 7.2, com os valores máximo e mínimo fixados:

- Se inferior ao ângulo mínimo, bloqueia-se o tiristor no ângulo mínimo e retorna-se ao programa principal;
- Se superior ao ângulo máximo, bloqueio no ângulo máximo e retorno ao programa principal;
- Se está no intervalo entre o ângulo máximo e mínimo, retorno ao programa principal, com o valor final obtido no passo 7.1.

De acordo com o exposto nos passos de 1 a 7.3, observa-se que os ângulos de ignição necessários à compensação, e o incremento para a regulação da tensão, são atualizados a cada meio-ciclo para cada par de tiristores. Isso torna a resposta do RCT bastante rápida e eficaz.

Salienta-se que o ganho fixo estabelecido na SUBROTINA ALPHA elaborada é de 2 graus, valor este tomado em caráter arbitrário. No entanto, pode-se com simplicidade incluir no passo 5 descrito anteriormente, uma função de transferência adequada para tornar mais eficiente a resposta do equipamento às variações da tensão. Poderá ser observado no ítem relativo a resultados das simulações, que 2 graus representaram boa performance para o compensador estático.

4.3.4. CASOS SIMULADOS

Através da conexão da subrotina de controle elaborada, ao programa UBC-EFEI, simulou-se diversas situações para o sistema apresentado anteriormente. Essas variações do arquivo base da tabela 4.1 envolveram a carga a ser compensada, bem como a potência de curto-circuito no barramento do compensador estático. A finalidade é verificar a resposta do equipamento de compensação frente a diversos tipos de perturbações.

Os casos simulados foram:

- **CASO 1** (base):

. Potência de curto-circuito na barra do compensador = 263 [MVA];

Relação X/R = 8.0;

. Carga considerada: $S_{ab} = 10.93.e^{j39.8}$ [MVA]
 $S_{bc} = 8.86.e^{j40.9}$ [MVA]
 $S_{ca} = 10.82.e^{j27.5}$ [MVA];

- **CASO 2**: Ídem CASO 1, porém com a saída da carga conectada entre as fases C e A;

- CASO 3: Ídem CASO 1, porém com a retirada das cargas relativas as fases CA e BC;
- CASO 4: Ídem CASO 1, mas com chaveamento da carga entre as fases C e A, aos 90 milisegundos.

A1 All
A2 All
A3 All
A4 All
A5 All
A6 All
A7 All
A8 All
A9 All
A10 All
A11 All
A12 All

5 187,74
6 187,74
5 187,74
11,40
11,40
A2 11,40
B2

Resumo de dados relativos ao Caso 1 (caso)
de chaveamento de fases sequenciais

CASO 1 - RCT C/ CAPACITOR FIXO-BALANC.DE CARGA TRIFASICA					
50.E-6	150.E-3	1		1.E-9	
FA				1.E9	
FB		FA			
FC		FA			
FA	FB	FA			
FB	FC	FA			
FC	FA	FA			
FA	TRFA			.037	1.01
FB	TRFB	FA	TRFA		
FC	TRFC	FA	TRFA		
TRFA		FA			2
TRFB		FA			2
TRFC		FA			2
TRFA	SVCA			.052	.829
TRFB	SVCB	TRFA	SVCA		1
TRFC	SVCC	TRFA	SVCA		1
SVCA	LOADA			.00001	1
SVCB	LOADB	SVCA	LOADA		1
SVCC	LOADC	SVCA	LOADA		1
LOADA	LA1			1.E-3	
	LA1	LB1		22.76	
	LA1	LB1			72.31
LOADB	LB1			1.E-3	
LOADB	LB2			1.E-3	
	LB2	LC2		28.32	
	LB2	LC2			86.79
LOADC	LC2			1.E-3	
LOADC	LC1			1.E-3	
	LC1	LA2		19.76	
	LC1	LA2			100.9
LOADA	LA2			1.E-3	
SVCA	SVCB			1.E9	2
SVCB	SVCC			1.E9	2
SVCC	SVCA			1.E9	2
A1	A11			.5E-6	
A1	A12	A1	A11		
A2	A22	A1	A11		
A2	A21	A1	A11		
C1	C11	A1	A11		
C1	C12	A1	A11		
C2	C22	A1	A11		
C2	C21	A1	A11		
B1	B11	A1	A11		
B1	B12	A1	A11		
B2	B22	A1	A11		
B2	B21	A1	A11		
A	B			.5	197.74
B	C			.5	197.74
C	A			.5	197.74
A	A1			11.46	
A	A2			11.46	1
B	B1	A	A2		
B	B2			11.46	1
C	C1	B	B2		

Tabela 4.1 - Arquivo de dados referente ao Caso 1 (base)
(continua na pagina seguinte)

(continuacao Tabela 4.1)

C	C2	A	A1		
SVCA		FA			1
SVCB		FA			
SVCC		FA			
A11		FA			
A12		FA			
A22		FA			
A21		FA			
B11		FA			
B12		FA			
B22		FA			
B21		FA			
C11		FA			
C12		FA			
C22		FA			
C21		FA			
-1A22	B12	0.		30.	1
-1A11	C21	.0		90.	2
-1B22	C12	0.		150.	3
-1B11	A21	0.		210.	4
-1C22	A12	-1.		270.	5
-1C11	B21	-1.		330.	6
14FA	+1 11267.7	60.	-30.		-1.
14FB	+1 11267.7	60.	-150.		-1.
14FC	+1 11267.7	60.	90.		-1.

Tabela 4.1 - Arquivo de Dados Referente ao Caso 1 (base)
(continuacao)

As simulações dos quatro casos citados foram considerados com o mesmo passo de integração ($\Delta t=50$ [μseg]), bem como tempos máximos de simulação iguais a 150 [mseg]. Também com referência as curvas resultado que serão apresentadas, as variáveis do programa (correntes em função do tempo no ramo do compensador), e aquelas calculadas pela SUBROTINA ALPHA (fatores de potência, correntes e tensões eficazes (RMS), todas compensadas), utilizaram-se de fatores de escala iguais ao longo das simulações. Dessa maneira, torna-se mais simples e direta a análise dos resultados obtidos. Como complemento importante para cada caso, são fornecidos no Apêndice A, tabelas com os componentes harmônicos presentes nas correntes compensadas de fase, onde poderá ser verificado a simetria alcançada para os componentes fundamentais. Além dos gráficos apresentados nesse ítem, podem ser encontrados outros no Apêndice B, ilustrando mais detalhadamente os resultados obtidos nas simulações.

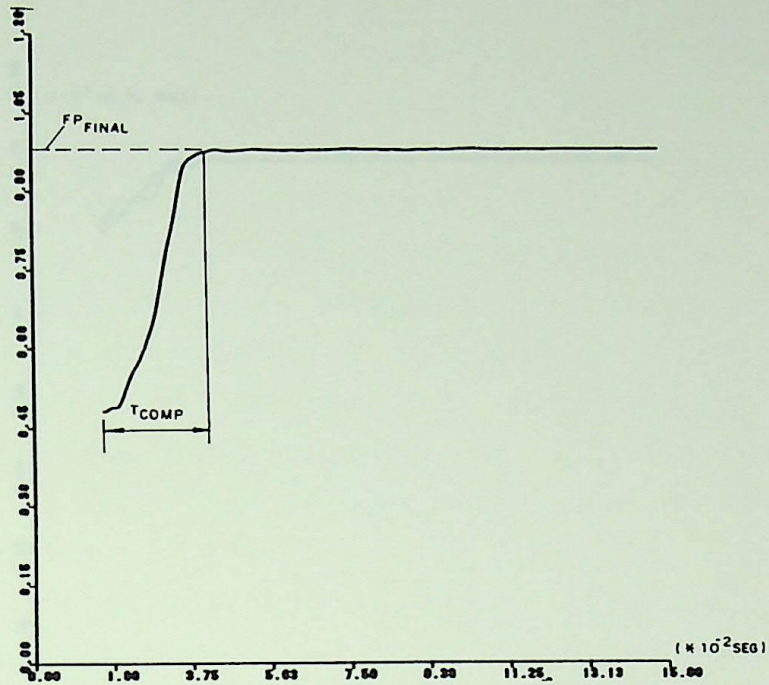
4.3.5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

a) CASO 1

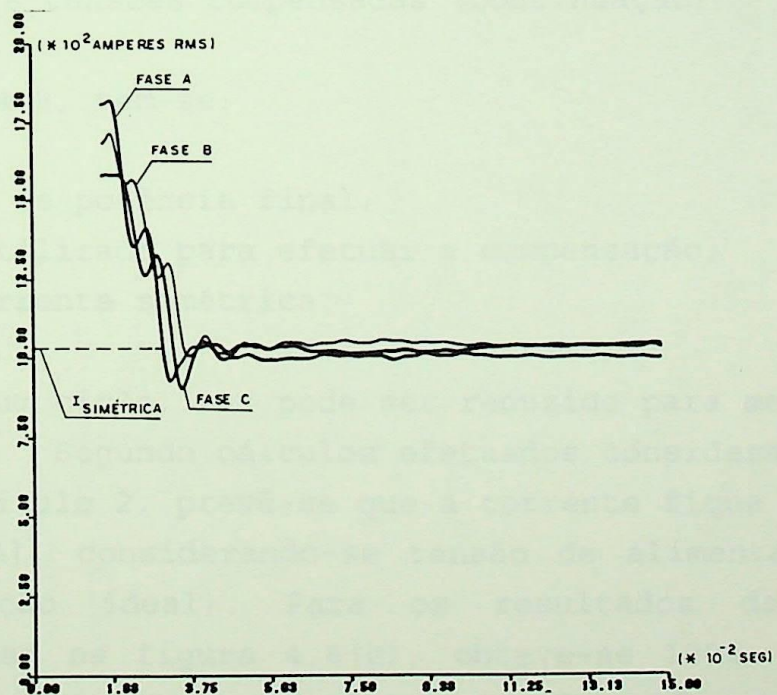
Para o caso base simulado, considerou-se carga indutiva conectada em delta. O ângulo de disparo inicial dos tiristores do RCT foi igual a zero grau, assim como para todos os demais casos. O objetivo é evitar a necessidade do cálculo das condições iniciais de tensão e corrente na barra do compensador. Conseguem-se, dessa forma, ondas senoidais no primeiro ciclo.

A figura 4.8 mostra a evolução do fator de potência, das correntes e tensões eficazes (RMS) compensadas.

Na figura 4.8-A o fator de potência final indicado é de 0.982, ao passo que o inicial é 0.47. Obviamente, que no fator de potência inicial está sendo considerado a presença de corrente plena nos reatores do compensador estático, pois como mencionado anteriormente, o disparo inicial de cada semicondutor é zero grau. O tempo gasto na compensação total da carga é de, aproximadamente, 24 milisegundos, que é coerente com a teoria abordada, que prevê um ciclo e meio (25 milisegundos). O tempo de

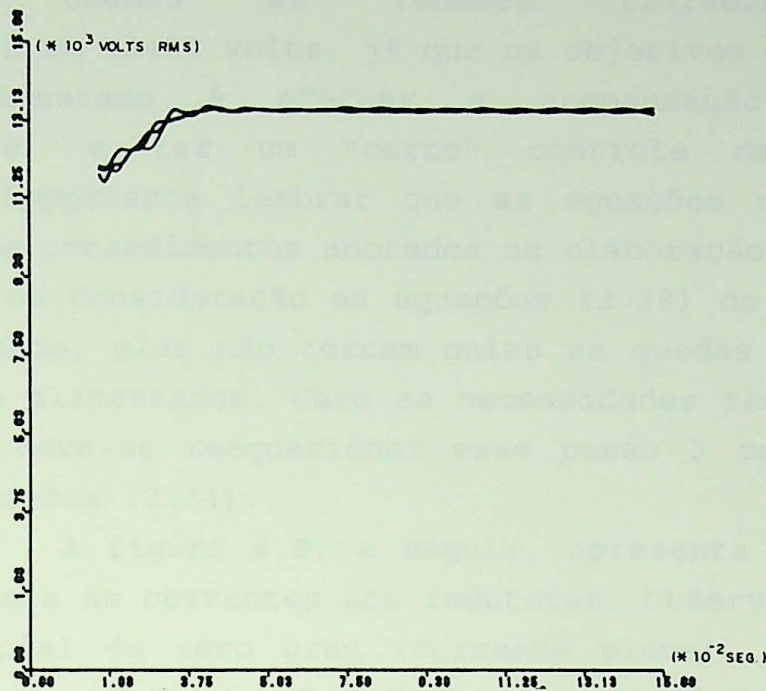


(a) Fator de potência da instalação



(b) Correntes RMS compensadas

Figura 4.8 - Evolução do fator de potência, correntes e tensões compensadas (continua na página seguinte)



(c) Tensões RMS compensadas

Figura 4.8 - Evolução do fator de potência, correntes e tensões compensadas (continuação)

Onde na figura 4.8, tem-se:

FP_{final} - Fator de potência final;

T_{COMP} - Tempo utilizado para efetuar a compensação;

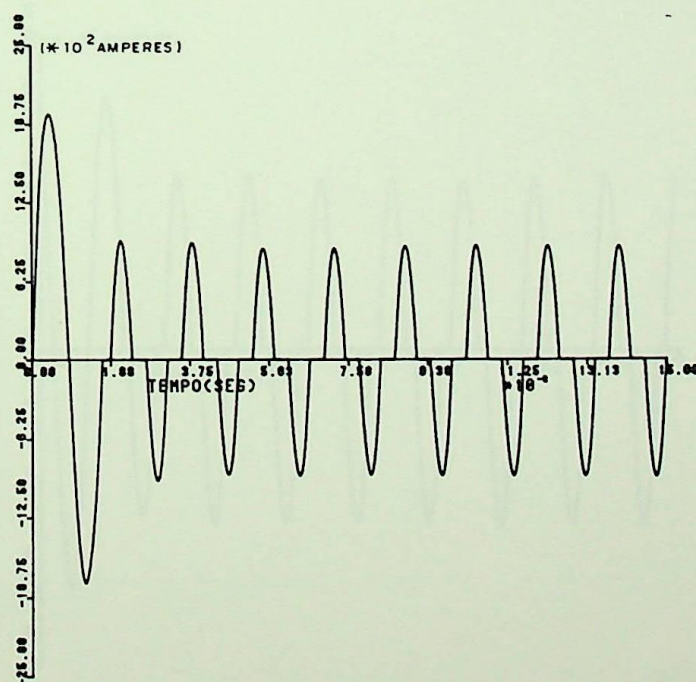
$I_{SIMÉTRICA}$ - Corrente simétrica.

medição foi de um ciclo, mas pode ser reduzido para meio ciclo.

Segundo cálculos efetuados considerando a teoria descrita no capítulo 2, prevê-se que a corrente fique simétrica em torno de 1034 [A], considerando-se tensão de alimentação igual à nominal (situação ideal). Para os resultados das correntes eficazes plotadas na figura 4.8(c), obteve-se 1006, 1039 e 1032 [A], respectivamente para as fases A, B e C, podendo serem consideradas, neste intervalo de tempo de simulação, como praticamente equilibradas (diferença de apenas 2,56%).

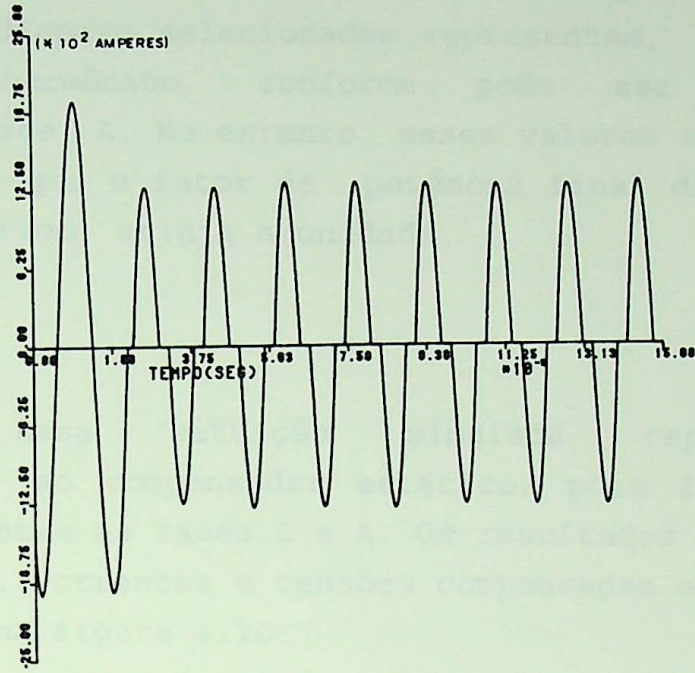
Quanto as tensões trifásicas, essas estabilizaram-se em 13420 volts, já que os objetivos do sistema de controle implementado é efetuar a compensação da carga, prioritariamente, e ter um "certo" controle da tensão de suprimento. É importante lembrar que as equações utilizadas no passo quatro dos procedimentos adotados na elaboração da SUBROTINA ALPHA, levaram em consideração as equações (2.38) do capítulo II. E, como mencionado, elas não tornam nulas as quedas de tensão em fase no sistema alimentador. Caso as necessidades também envolvam essa condição, deve-se reequacionar esse passo 3 baseando-se no conjunto de equações (2.34).

A figura 4.9, a seguir, apresenta as formas de onda no tempo para as correntes nos indutores. Observa-se o ângulo de disparo inicial de zero grau (corrente plena), e os ângulos selecionados para a compensação. Esses são de 39.1, 26.3 e 27.4

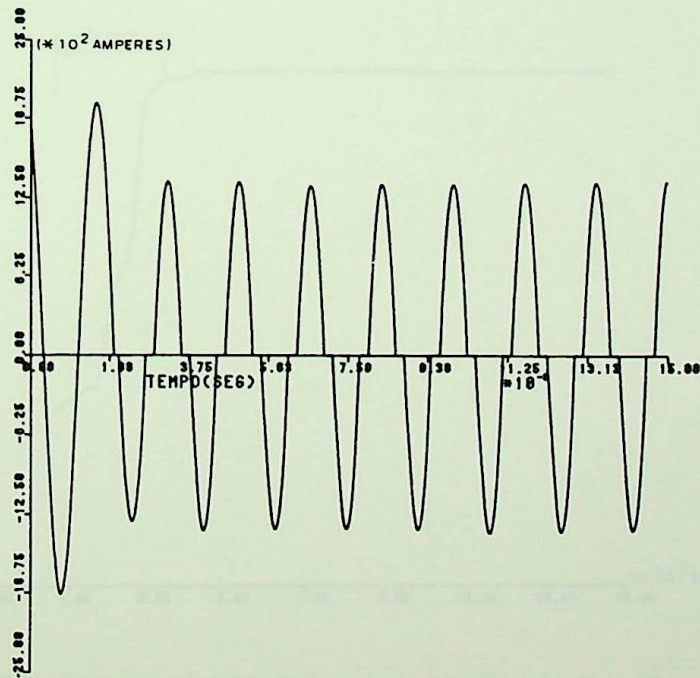


(a) Ramo AB

Figura 4.9 - Correntes no tempo nos indutores do RCT (continua na página seguinte)



(b) Ramo BC



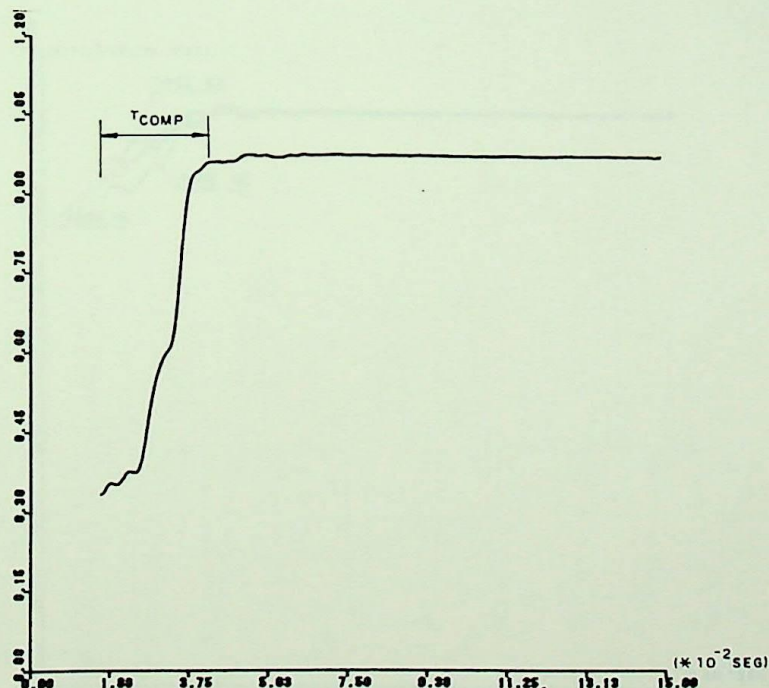
(c) Ramo CA

Figura 4.9 - Correntes no tempo nos indutores do RCT (continuação)

graus, para os tiristores das fases AB, BC e CA, respectivamente. Os ângulos de disparo selecionados representam, nesse caso, baixo conteúdo harmônico, conforme pode ser observado na tabela 1 do apêndice A. No entanto, esses valores são suficientes para não permitir que o fator de potência final da carga, vista pelo sistema elétrico, atinja a unidade.

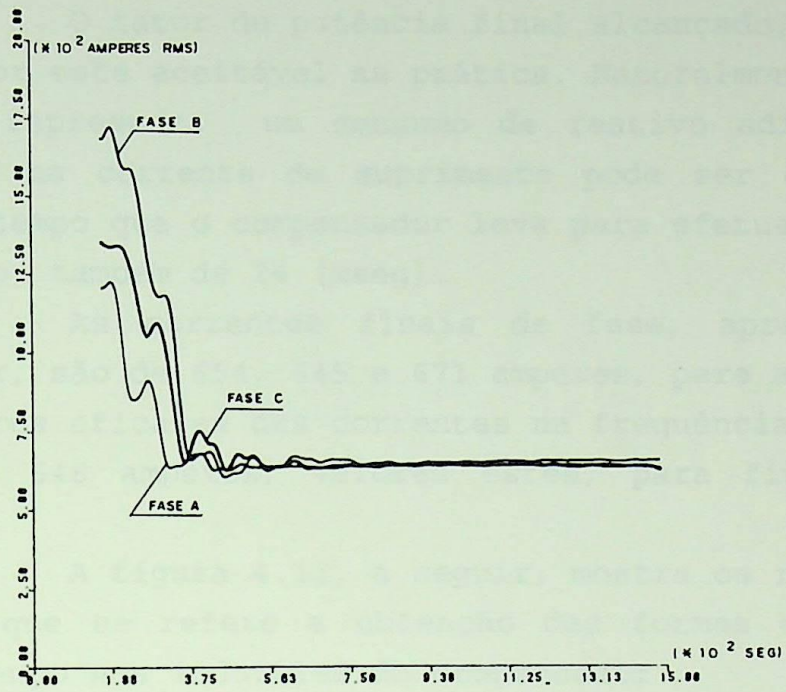
b) CASO 2

Essa situação simulada representa uma solicitação maior ao compensador estático, pois foi retirada a carga conectada entre as fases C e A. Os resultados da correção do fator de potência, correntes e tensões compensadas eficazes (RMS), são apresentadas na figura 4.10.

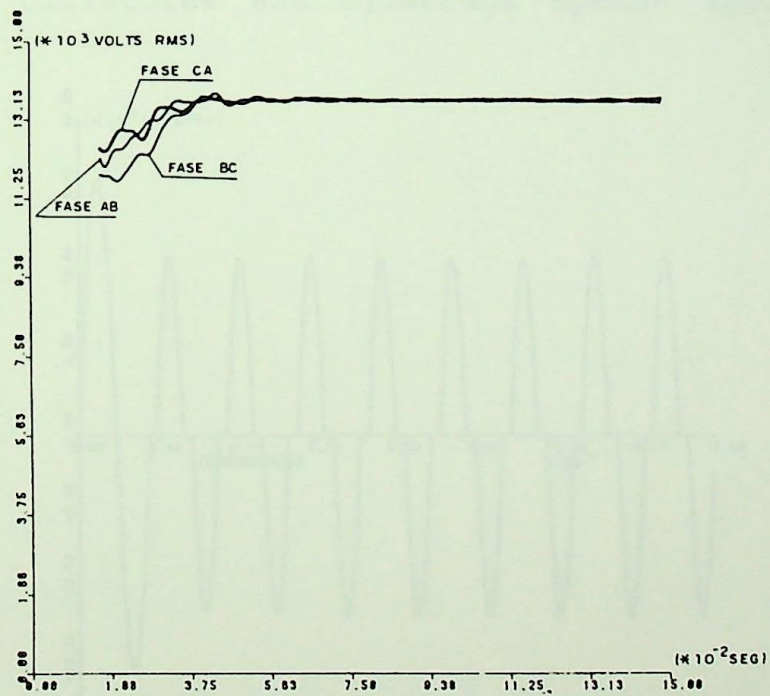


(a) fator de potência da instalação

Figura 4.10 - Evolução do fator de potência, correntes e tensões RMS compensadas do CASO 2 (continua na página seguinte)



(b) Correntes de fase rms compensadas



(c) Tensões rms compensadas

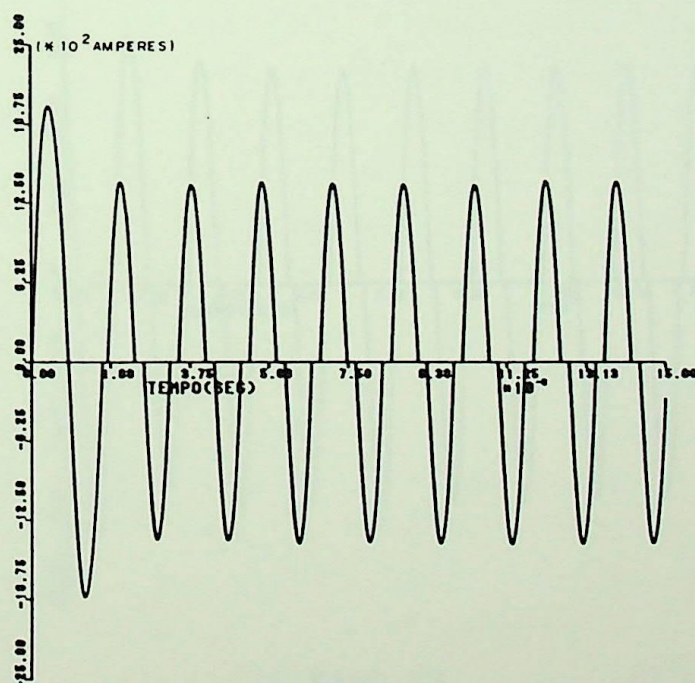
Figura 4.10 - Evolução do fator de potência, correntes e tensões RMS compensadas do CASO 3 (continuação)

O fator de potência final alcançado, nesse caso, é de 0.97, valor este aceitável na prática. Naturalmente a injeção de harmônicos representa um consumo de reativo adicional, e a presença deles na corrente de suprimento pode ser observada no apêndice A. O tempo que o compensador leva para efetuar a correção foi, neste caso, também de 24 [mseg].

As correntes finais de fase, apresentadas na figura anterior, são de 654, 645 e 671 amperes, para as fases A, B e C, e os valores eficazes das correntes na frequência fundamental de 623, 645 e 648 amperes, valores estes, para fins práticos, adequados.

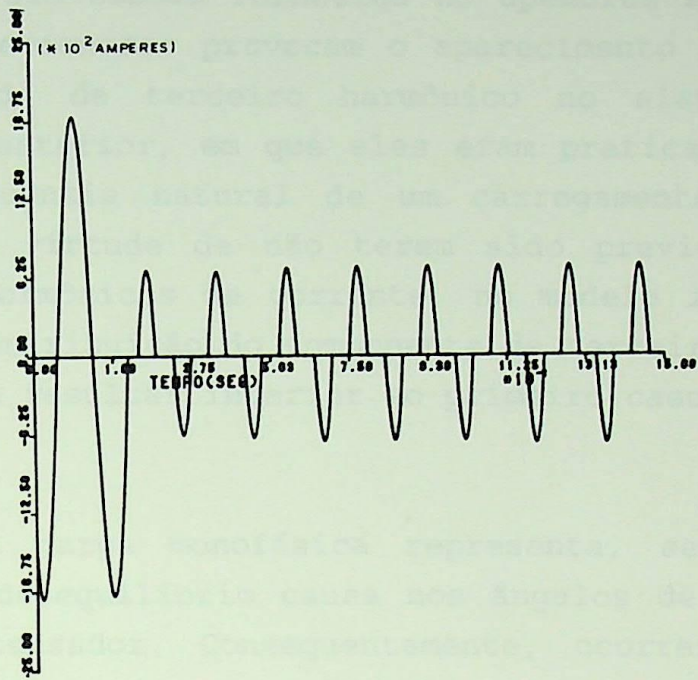
A figura 4.11, a seguir, mostra os resultados da simulação, no que se refere a obtenção das formas de onda, das correntes no tempo nos indutores do compensador.

Os ângulos selecionados pelo sistema de controle para a correção da carga, foram de 24.2° , 47.7° e 14.8° , respectivamente, para os ramos AB, BC e CA. Note que os instantes de disparo dos tiristores são ajustados apenas após o primeiro ciclo.

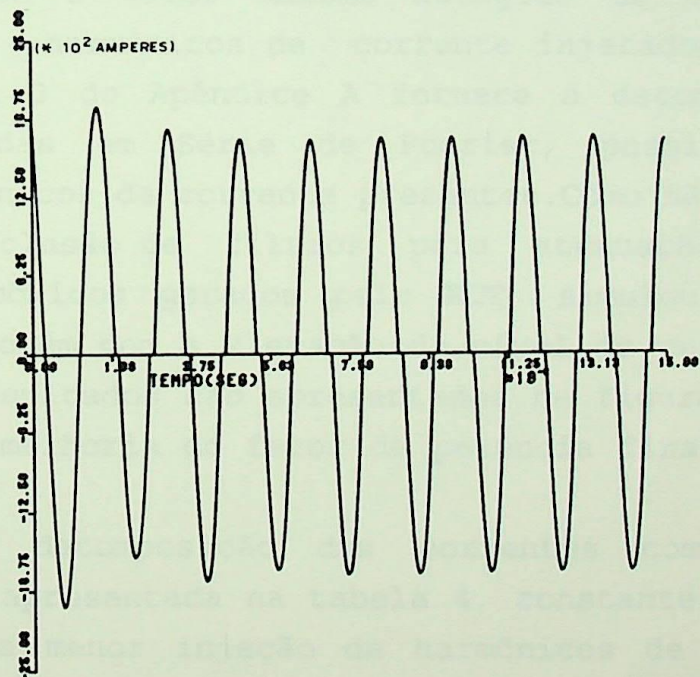


(a) Ramo AB

Figura 4.11 - Correntes nos indutores do compensador estático - CASO 2 (continua na página seguinte)



(b) Ramo BC



(c) Ramo CA

Figura 4.11 - Correntes nos indutores do compensador estático - CASO 2 (continuação)

Pela tabela fornecida no apêndice A, observa-se que os ângulos selecionados provocam o aparecimento de correntes de alta intensidade de terceiro harmônico no sistema AC, ao contrário do caso anterior, em que eles eram praticamente nulos. Essa é uma consequência natural de um carregamento fortemente desequilibrado. Em virtude de não terem sido previstos filtros para absorção de harmônicos de corrente, no modelo implementado, houve uma grande contribuição do componente de terceira ordem para o fator de potência resultar inferior ao primeiro caso.

c) CASO 3

A carga monofásica representa, sem dúvida, a operação que mais desequilíbrio causa nos ângulos de ignição dos tiristores do compensador. Consequentemente, ocorrerá acentuada injeção de harmônicos de corrente no sistema elétrico, que conduzirá a uma necessidade imprescindível de filtros.

A figura 4.12 mostra a evolução do fator de potência. Observa-se o valor máximo atingido de 0.69, devido principalmente aos harmônicos de corrente injetados no sistema pelo RCT. A tabela 3 do Apêndice A fornece a decomposição das correntes compensadas em Série de Fourier, possibilitando a avaliação dos harmônicos de corrente presentes. Como não é objetivo desse trabalho a inclusão de filtros para atenuação dos mais altos níveis harmônicos gerados pelo RCT, simulou-se o mesmo sistema anterior, porém com a elevação do nível de curto na barra da indústria. Os resultados são apresentados na figura 4.13, onde pode-se observar a melhoria do fator de potência final alcançado, que é de 0.85.

A decomposição das correntes compensadas em Série de Fourier é apresentada na tabela 4, constante do Apêndice A, onde nota-se uma menor injeção de harmônicos de corrente no sistema elétrico de potência. Principalmente os de mais baixa ordem. É importante salientar que as potências médias consumidas apresentam-se bem próximas do equilíbrio das componentes fundamentais da corrente compensada.

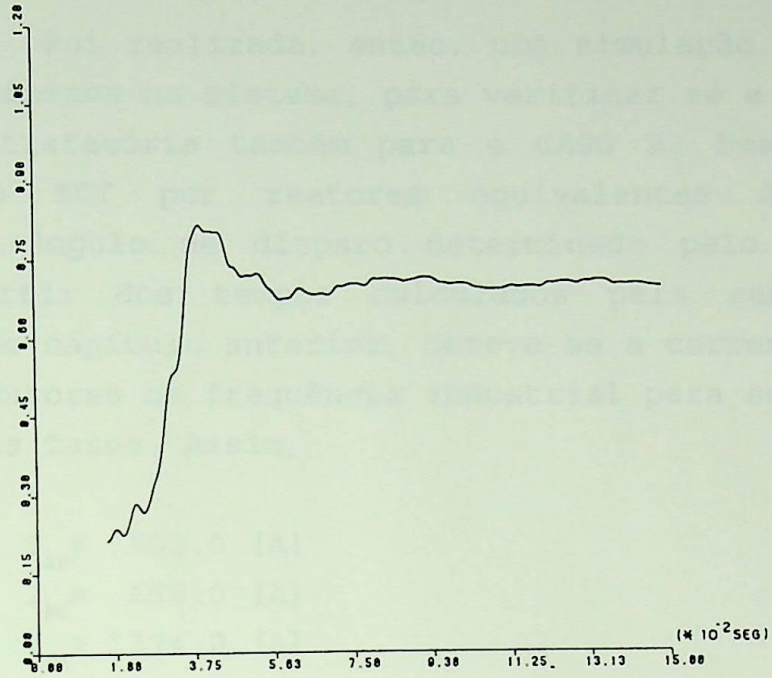


Figura 4.12 - Evolução do fator de potência para o CASO 3, com $S_{CC} = 263$ MVA, 13.8 KV

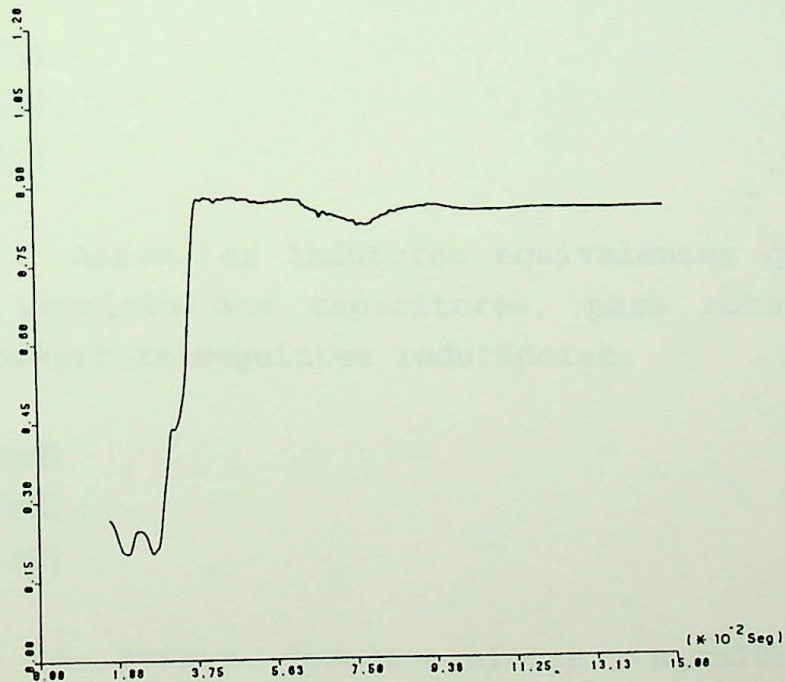


Figura 4.13 - Evolução do fator de potência com $S_{CC} = \infty$ na barra da indústria

Foi realizada, então, uma simulação que evita a presença de harmônicos no sistema, para verificar se a resposta do controle foi satisfatória também para o CASO 3. Dessa maneira, substituiu-se o RCT por reatores equivalentes àqueles que correspondem ao ângulo de disparo determinado pelo sistema de controle. A partir dos tempos calculados pela subrotina, da equação (2.38) do capítulo anterior, obteve-se a corrente que deve percorrer os indutores na frequência industrial para ser realizada a compensação das fases. Assim,

$$\begin{aligned} - \alpha_{AB} &= 34.58 & \Rightarrow & I_{AB} \cong 502.0 \text{ [A]} \\ - \alpha_{BC} &= 28.43 & \Rightarrow & I_{BC} \cong 658.0 \text{ [A]} \\ - \alpha_{CA} &= 6.27 & \Rightarrow & I_{CA} \cong 1374.0 \text{ [A]} \end{aligned}$$

Salienta-se que os valores das tensões entre-fases, utilizadas no cálculo das correntes que devem percorrer o RCT, foram retiradas também dos resultados da rotina implementada. Assim, quando elas estabilizaram-se após ser efetuada a compensação, seus valores foram:

$$\begin{aligned} - U_{AB} &= 13641 \text{ [V]} \\ - U_{BC} &= 13625 \text{ [V]} \\ - U_{CA} &= 13786 \text{ [V]} \end{aligned}$$

Assim, os indutores equivalentes que devem ser conectados em paralelo aos capacitores, para substituição dos RCT's, devem possuir as seguintes indutâncias:

$$\begin{aligned} - L_{AB} &\cong 71.99 \text{ [mH]} \\ - L_{BC} &\cong 54.90 \text{ [mH]} \\ - L_{CA} &\cong 26.62 \text{ [mH]} \end{aligned}$$

A partir desses valores, simulou-se a nova situação, e os resultados dos cálculos de regime permanente para as tensões e correntes compensadas, bem como das potências ativa e reativa consumida pelo sistema carga/compensador, são apresentadas

na tabela 4.2. Observa-se através da mesma, o alto grau de simetrização das correntes compensadas, como também da potência ativa consumida. Os valores alcançados pelas correntes são de 347, 354 e 356 amperes, para as fases A, B e C, que estão bem próximas do valor previsto de 345 amperes. Além disso, os fatores de potência das fases, estabelecidos a partir das potências médias e reativas foram de 0.996, 0.994 e 0.997, valores estes adequados à operação prevista do compensador estático.

d) CASO 4

Para finalizar as simulações referentes ao compensador estático shunt/sistema de controle, foi considerada a retirada da carga CA, no instante 90 [mseg]. Assim, após efetuar a compensação da carga trifásica, ocorre um novo reajuste do sistema de controle. A figura 4.14 ilustra os principais resultados da simulação. Nota-se, através desta figura, a oscilação causada com a retirada da carga CA e rapidamente corrigida pelo equipamento compensador (cerca de 18 [mseg]).

A figura 4.15 mostra as formas de onda das correntes no tempo que passam pelos reatores do RCT, onde pode ser observado o reajustamento dos ângulos de disparo, após a retirada da carga citada.

CASO 3 - REATORES EQUIVALENTES AOS ANGULOS DE DISPARO DO RCT

STEADY STATE CALCULATIONS COMPLETE.

STEADY STATE SOLUTION

NODE VOLTAGES(RMS)

NAME	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
TRFA	7.9674E+03	-30.96	6.8326E+03	-4.0982E+03
TRFB	7.9697E+03	-150.98	-6.9688E+03	-3.8668E+03
TRFC	7.9662E+03	89.02	1.3625E+02	7.9650E+03
SVCA	7.9615E+03	-31.75	6.7704E+03	-4.1889E+03
SVCB	7.9657E+03	-151.78	-7.0191E+03	-3.7663E+03
SVCC	7.9592E+03	88.21	2.4869E+02	7.9553E+03

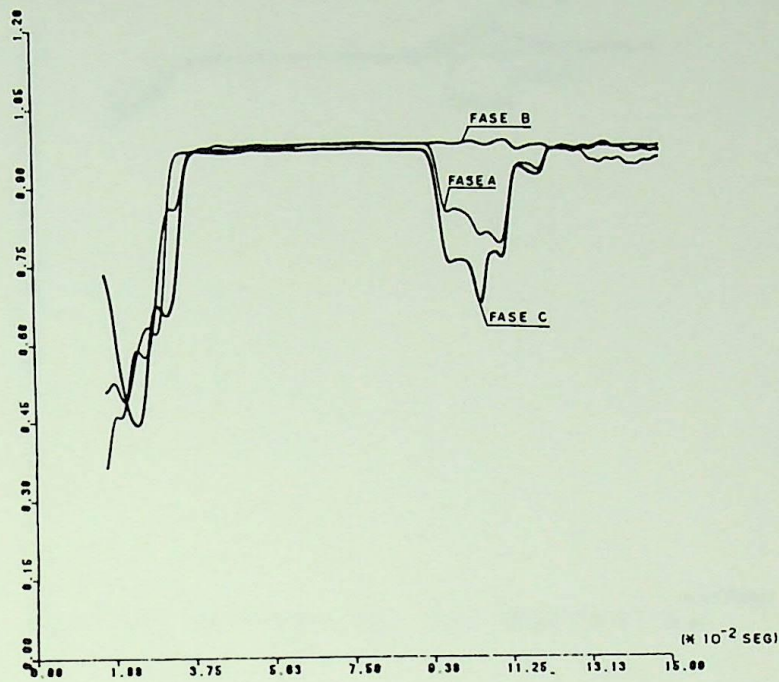
BRANCH CURRENTS(RMS)

FROM	TO	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
TRFA	SVCA	3.4726E+02	-24.97	3.1481E+02	-1.4658E+02
TRFB	SVCB	3.5462E+02	-143.98	-2.8682E+02	-2.0854E+02
TRFC	SVCC	3.5622E+02	94.51	-2.7989E+01	3.5512E+02

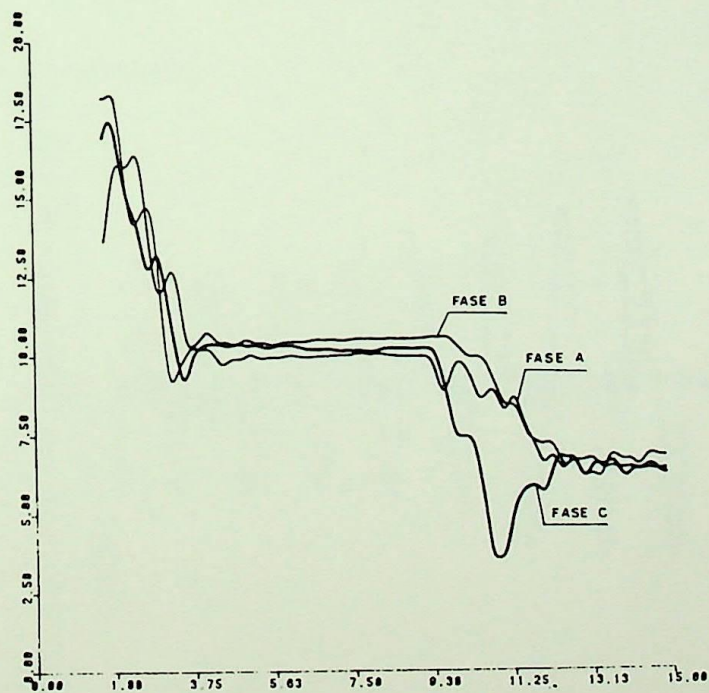
POWER

FROM	TO	REAL POWER	REACTIVE POWER	APPARENT POWER
TRFA	SVCA	2.7517E+06	-2.8863E+05	2.7668E+06
TRFB	SVCB	2.8052E+06	-3.4417E+05	2.8262E+06
TRFC	SVCC	2.8247E+06	-2.7132E+05	2.8377E+06

Tabela 4.2 - Resultados de regime permanente para o caso 3 - substituicao do RCT por reatores equivalentes

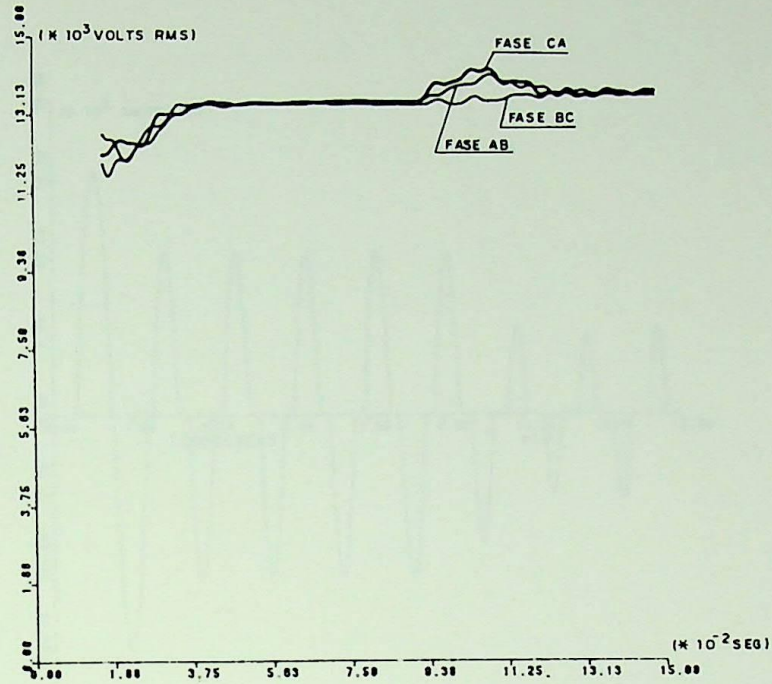


(a) Fator de potência das fases



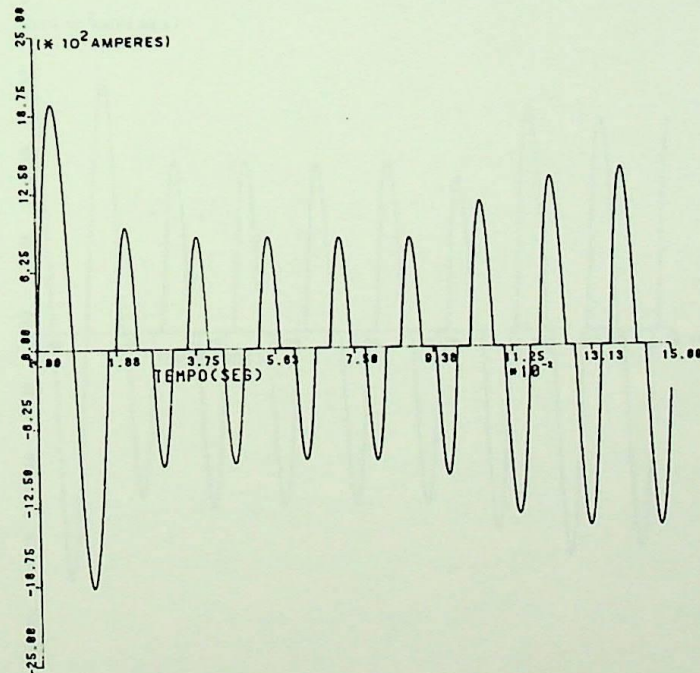
(b) Correntes RMS compensadas

Figura 4.14 - Evolução do fator de potência, correntes e tensões rms compensadas - CASO 4
(continua na página seguinte)



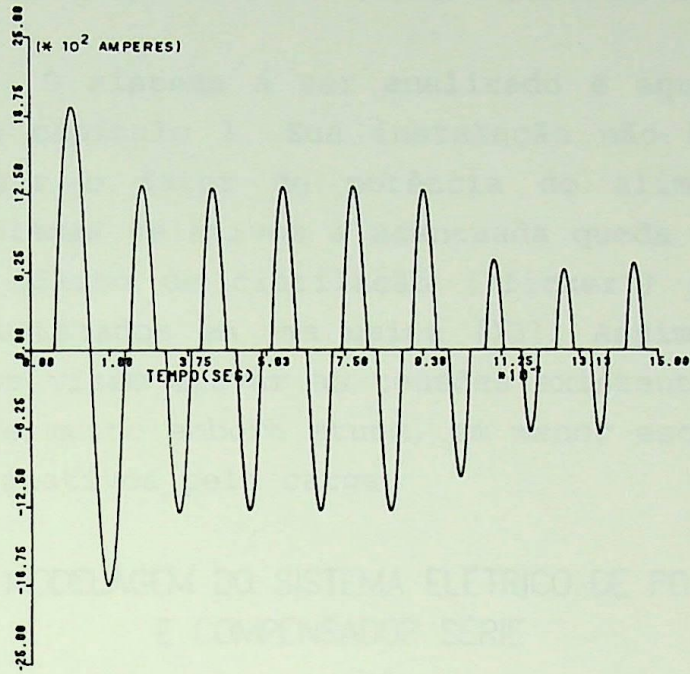
(c) Tensões rms compensadas

Figura 4.14 - Evolução do fator de potência, correntes e tensões rms compensadas - CASO 4 (continuação)

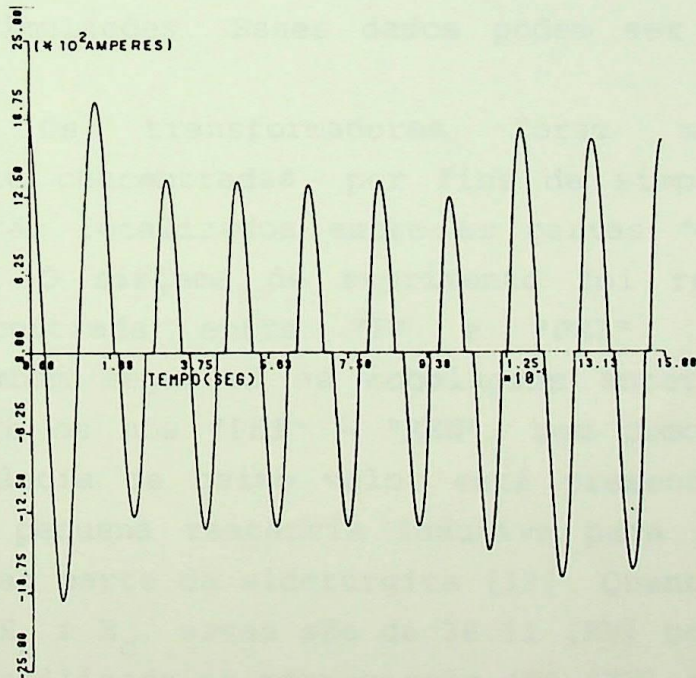


(a) Corrente reator AB

Figura 4.15 - Correntes no tempo para os reatores do compensador - CASO 4 (continua na página seguinte)



(b) Corrente reator BC



(c) Corrente reator CA

Figura 4.15 - Correntes no tempo para os reatores do compensador - CASO 4 (continuação)

4.4. SIMULAÇÃO DE COMPENSADOR ESTÁTICO SÉRIE

O sistema a ser analisado é aquele apresentado no item 3.5, do capítulo 3. Sua instalação não teve o objetivo maior de corrigir o fator de potência do alimentador, e sim resolver os problemas relativos a acentuada queda de tensão, além de minimizar o efeito de cintilação ("flicker") provocado pelos fornos a arco instalados em uma usina [13]. Assim, os resultados que serão obtidos visam elevar as tensões existentes a frente dos capacitores série muito embora atuem, em menor escala, na redução do "consumo" de reativos pela carga.

4.4.1. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA E COMPENSADOR SÉRIE

A configuração do sistema simulado é aquele apresentado na figura 4.16. Os seus dados de ramo podem ser obtidos na tabela 4.3, onde é mostrado o arquivo de dados utilizado nas simulações. Esses dados podem ser verificados em [13].

Os transformadores foram modelados como impedâncias série concentradas, por fins de simplicidade. Esses equipamentos estão localizados entre as barras "SER" - "MID" e "CRUC" - "TRF". O sistema de suprimento foi representado por indutância concentrada entre "F" e "PHI". As linhas de distribuição também seguiram as modelagens anteriores, e estão localizadas entre os nós "PHI" - "KEN", bem como entre "MID" - "CRUC". A indutância de baixo valor está presente somente para representar uma pequena reatância indutiva para representar uma subestação que faz parte da siderúrgica [13]. Quanto as tensões de alimentação E_a , E_b e E_c , essas são de 38.11 [KV] correspondendo ao nível da tensão utilizada na transmissão (66 [KV] entre-fases).

A carga foi representada como impedância constante na sua potência máxima instantânea. Para o cálculo dos seus valores foi considerada tensão de alimentação nominal de transmissão. Assim, uma carga trifásica de 36.5 [MVA] foi dividida

CASO 2 - C/COMPENSADOR SERIE - CARGA EQUILIBRADA
 50.E-6 1 1.E-91

FA				1.E9		
FB		FA				
FC		FA				
FA	FB	FA				
FB	FC	FA				
FC	FA	FA				
FA	PHI-A				9.52	
FB	PHI-B	FA	PHI-A			
FC	PHI-C	FA	PHI-A			
PHI-A	KEN-A			2.59	20.3	1
PHI-B	KEN-B	PHI-A	KEN-A			1
PHI-C	KEN-C	PHI-A	KEN-A			1
KEN-A		FA				
KEN-B		FA				
KEN-C		FA				
KEN-A	SER-A				.5	196.5
KEN-B	SER-B	KEN-A	SER-A			1
KEN-C	SER-C	KEN-A	SER-A			1
SER-A	MID-A			.73	5.44	
SER-B	MID-B	SER-A	MID-A			
SER-C	MID-C	SER-A	MID-A			
SER-A		FA				2
SER-B		FA				2
SER-C		FA				2
MID-A	CRUC-A			.62	4.69	
MID-B	CRUC-B	MID-A	CRUC-A			
MID-C	CRUC-C	MID-A	CRUC-A			
CRUC-A	TRF-A			.69	21.22	1
CRUC-B	TRF-B	CRUC-A	TRF-A			1
CRUC-C	TRF-C	CRUC-A	TRF-A			1
MID-A		FA				2
MID-B		FA				2
MID-C		FA				2
CRUC-A		FA				2
CRUC-B		FA				2
CRUC-C		FA				2
CRUC-A	CRUC-B	FA				
CRUC-B	CRUC-C	FA				
CRUC-C	CRUC-A	FA				
TRF-A	LOADA			.001		
TRF-B	LOADB			.001		
TRF-C	LOADC			.001		
TRF-A		FA				
TRF-B		FA				
TRF-C		FA				
LOADA	O			152.3		
LOADA	O				508.	
LOADB	O			152.3		
LOADB	O				508.	
LOADC	O			152.3		
LOADC	O				508.	

14FA	+1	53888.	60.	-30.	-1.
14FB	+1	53888.	60.	-150.	-1.
14FC	+1	53888.	60.	90.	-1.

Tabela 4.3 - Arquivo de dados do caso 2 da compensacao serie

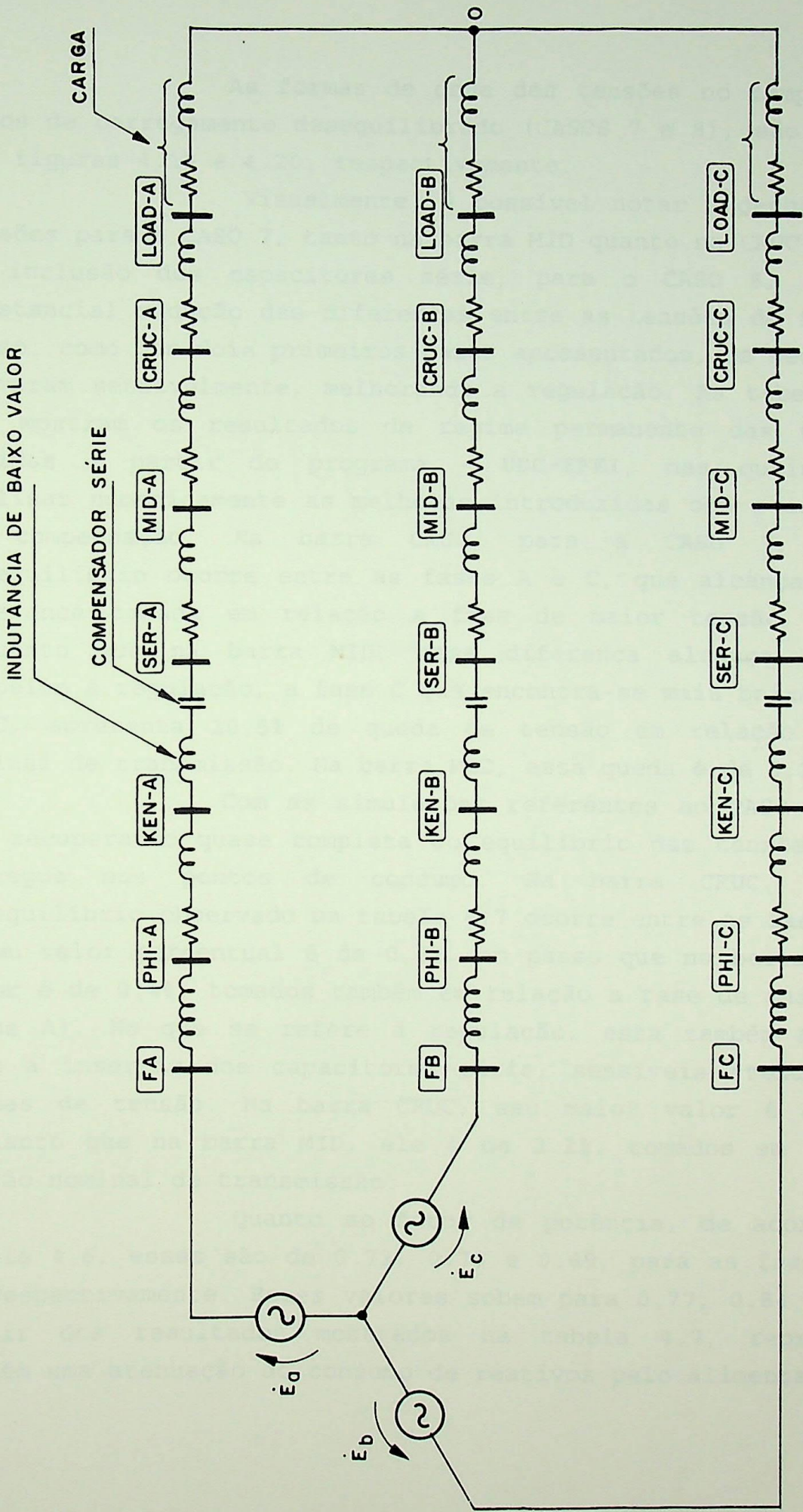
igualmente entre as fases, para os CASOS 5 e 6, e foi dividida de forma desequilibrada para os CASOS 7 e 8.

4.4.2. CASOS SIMULADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Foram quatro os casos simulados, todos tomando como base o arquivo de dados apresentado na tabela 4.3. São eles:

- CASO 5: Sistema sem compensação série, alimentando carregamento equilibrado em 9.49 [MW] e 7.61 [MVar], para cada fase;
- CASO 6: Ídem CASO 5, porém com a inclusão de capacitores série;
- CASO 7: Sistema sem compensação série, alimentando carregamento desequilibrado de 7.80 [MW] e 6.25 [MVar], 9.75 [MW] e 7.82 [MVar], 10.92 [MW] e 8.76 [MVar], respectivamente para as fases A, B e C;
- CASO 8: Ídem CASO 7, porém com a inclusão de capacitores série.

Para as simulações referentes ao CASO 5, foram obtidas as tensões no tempo apresentadas na figura 4.17, enquanto que para o CASO 6, estão mostradas na figura 4.18. Através dessas ilustrações, observa-se a acentuada elevação da tensão após a instalação dos capacitores série, tanto na barra CRUC quanto na barra MID. Os valores eficazes das tensões, assim como o fluxo de reativos para os dois casos, podem ser observados nas tabelas 4.4 e 4.5. Antes da instalação do equipamento compensador, a tensão na barra MID era de aproximadamente 34,9 [kV] enquanto que em CRUC era de 34,44 [kV]. Isto significa queda de tensão de 8,4% (MID), e 9,6% (CRUC), em relação a tensão nominal de distribuição. Após a instalação do citado compensador esses valores foram para 37,37 [kV] (1,9%) e 36,89 [kV] (3,2%), respectivamente. No que se refere ao fator de potência, esse subiu de 74 para 80%, representando uma melhoria nesta grandeza.



INDUTANCIA DE BAIXO VALOR

COMPENSADOR SÉRIE

CARGA

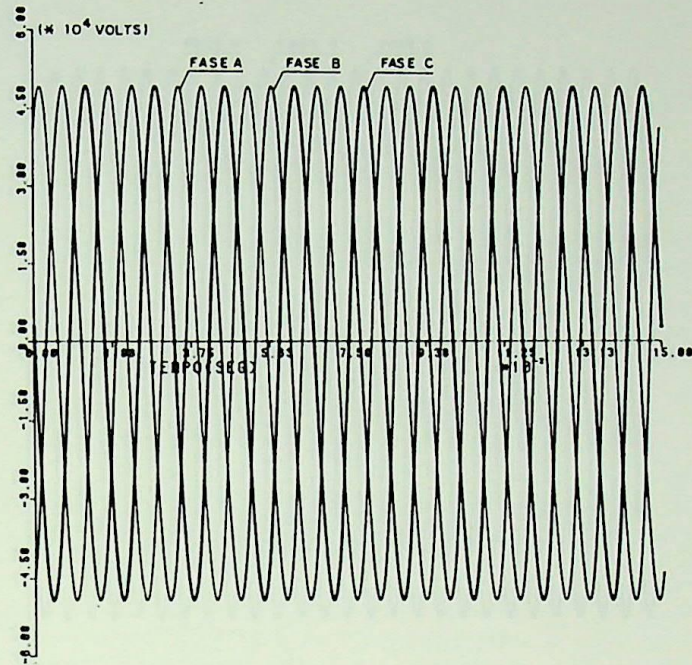
Sistema com compensação série simulado

As formas de onda das tensões no tempo para os casos de carregamento desequilibrado (CASOS 7 e 8), são mostradas nas figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.

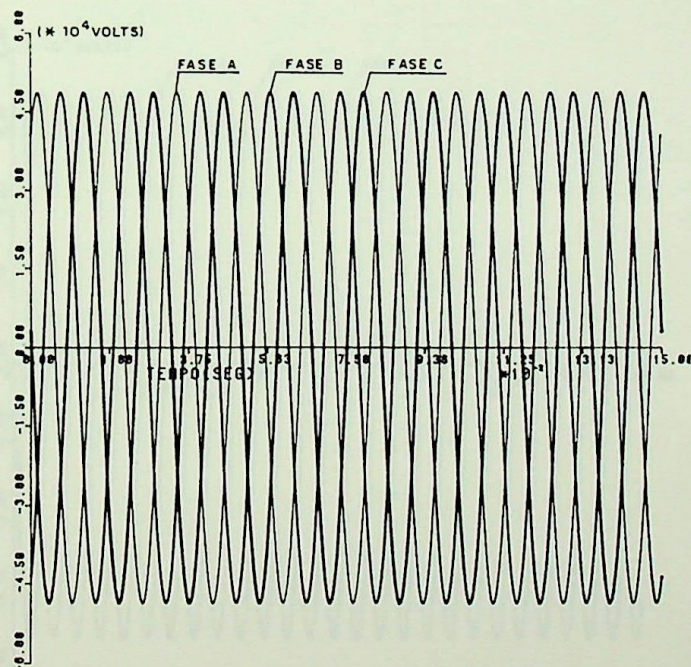
Visualmente, é possível notar o desbalanço das tensões para o CASO 7, tanto na barra MID quanto na CRUC. A partir da inclusão dos capacitores série, para o CASO 8, houve uma substancial redução das diferenças entre as tensões de fase. Além disso, como nos dois primeiros casos apresentados, os seus valores elevaram sensivelmente, melhorando a regulação. As tabelas 4.6 e 4.7 mostram os resultados de regime permanente das simulações obtidas a partir do programa - **UBC-EFEI**, nas quais pode-se analisar numericamente as melhoras introduzidas com o equipamento de compensação. Na barra CRUC, para a CASO 7, o maior desequilíbrio ocorre entre as fases A e C, que alcançam 1,8% de diferença tomada em relação a fase de maior tensão (fase A), enquanto que na barra MID, essa diferença alcança 1,6%. Com respeito à regulação, a fase C que encontra-se mais baixa na barra CRUC, apresenta 10,5% de queda de tensão em relação a tensão nominal de transmissão. Na barra MID, essa queda é de 9,2%.

Com as simulações referentes ao CASO 8, tem-se uma recuperação quase completa do equilíbrio das tensões de fase entregue nos pontos de consumo. Na barra CRUC, o máximo desequilíbrio observado na tabela 4.7 ocorre entre as fases A e B, e seu valor percentual é de 0,5%, ao passo que na barra MID esse valor é de 0,4%, tomados também em relação a fase de maior tensão (fase A). No que se refere à regulação, esta também apresenta, após a inserção dos capacitores série, sensíveis atenuações das quedas de tensão. Na barra CRUC, seu maior valor é de 3.32%, enquanto que na barra MID, ele é de 2.1%, tomados em relação à tensão nominal de transmissão.

Quanto ao fator de potência, de acordo com a tabela 4.6, esses são de 0.72, 0.79 e 0.69, para as fases A, B e C, respectivamente. Esses valores sobem para 0.77, 0.84 e 0.75, a partir dos resultados mostrados na tabela 4.7, representando também uma atenuação do consumo de reativos pelo alimentador.

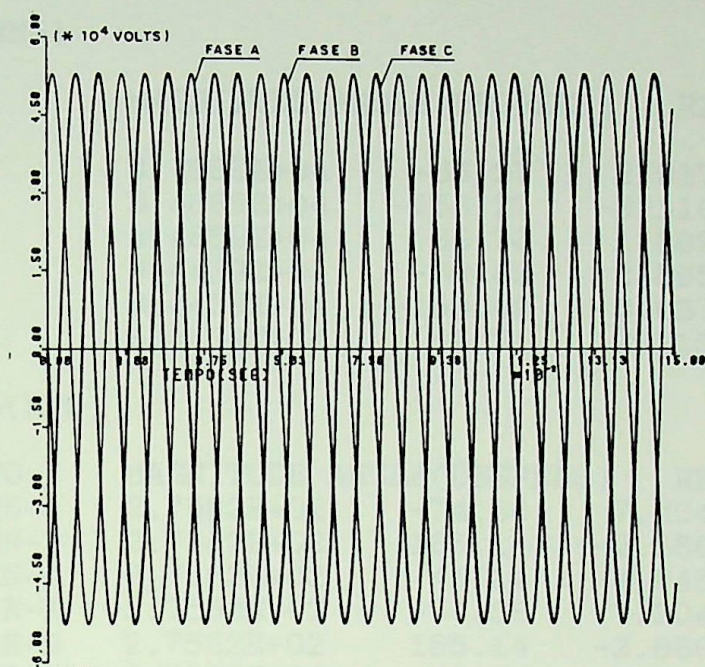


(a) Tensão na barra MID

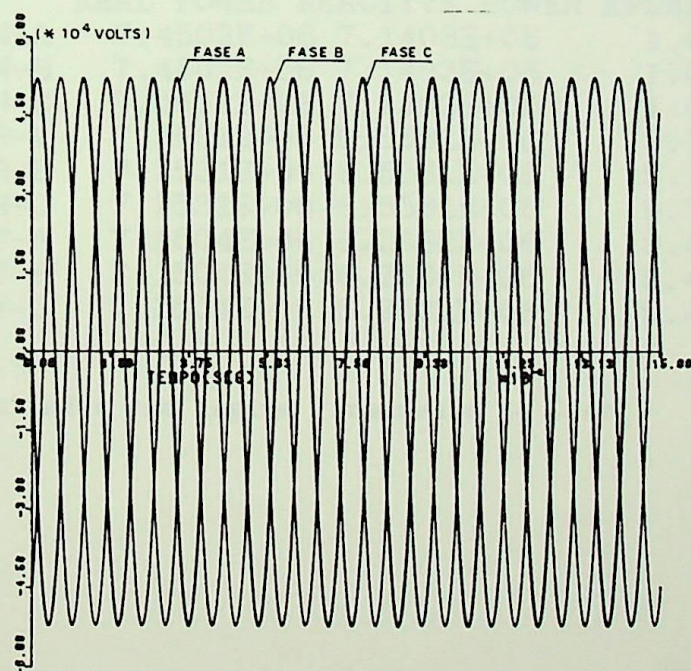


(b) Tensão na barra CRUC

Figura 4.17 - Formas de onda das tensões no tempo para o CASO 5



(a) Tensão na barra MID



(b) Tensão na barra CRUC

Figura 4.18 - Formas de onda das tensões no tempo para o CASO 6

CASO 1 - S/COMPENSADOR SERIE - CARGA EQUILIBRADA

STEADY STATE CALCULATIONS COMPLETE.

STEADY STATE SOLUTION

NODE VOLTAGES(RMS)

NAME	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
MID-A	3.4889E+04	-33.27	2.9171E+04	-1.9140E+04
MID-B	3.4889E+04	-153.27	-3.1161E+04	-1.5693E+04
MID-C	3.4889E+04	86.73	1.9899E+03	3.4833E+04
CRUC-A	3.4439E+04	-33.69	2.8656E+04	-1.9102E+04
CRUC-B	3.4439E+04	-153.69	-3.0871E+04	-1.5265E+04
CRUC-C	3.4439E+04	86.31	2.2150E+03	3.4367E+04

BRANCH CURRENTS(RMS)

FROM	TO	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
PHI-A	KEN-A	2.7582E+02	-74.86	7.2049E+01	-2.6625E+02
PHI-B	KEN-B	2.7582E+02	165.14	-2.6660E+02	7.0728E+01
PHI-C	KEN-C	2.7582E+02	45.14	1.9455E+02	1.9552E+02
KEN-A	SER-A	2.7582E+02	-74.86	7.2048E+01	-2.6625E+02
KEN-B	SER-B	2.7582E+02	165.14	-2.6660E+02	7.0728E+01
KEN-C	SER-C	2.7582E+02	45.14	1.9455E+02	1.9552E+02
CRUC-A	TRF-A	2.7582E+02	-74.86	7.2048E+01	-2.6625E+02
CRUC-B	TRF-B	2.7582E+02	165.14	-2.6660E+02	7.0728E+01
CRUC-C	TRF-C	2.7582E+02	45.14	1.9455E+02	1.9552E+02

POWER

FROM	TO	REAL POWER	REACTIVE POWER	APPARENT POWER
PHI-A	KEN-A	7.4502E+06	7.1403E+06	1.0319E+07
PHI-B	KEN-B	7.4502E+06	7.1403E+06	1.0319E+07
PHI-C	KEN-C	7.4502E+06	7.1403E+06	1.0319E+07
KEN-A	SER-A	7.2531E+06	6.5581E+06	9.7784E+06
KEN-B	SER-B	7.2531E+06	6.5581E+06	9.7784E+06
KEN-C	SER-C	7.2531E+06	6.5581E+06	9.7784E+06
CRUC-A	TRF-A	7.1504E+06	6.2532E+06	9.4990E+06
CRUC-B	TRF-B	7.1504E+06	6.2532E+06	9.4990E+06
CRUC-C	TRF-C	7.1504E+06	6.2532E+06	9.4990E+06

Tabela 4.4 - Resultados de Regime Permanente do Caso 5

CASO 2 - C/COMPENSADOR SERIE - CARGA EQUILIBRADA

STEADY STATE CALCULATIONS COMPLETE.

STEADY STATE SOLUTION

NODE VOLTAGES(RMS)

NAME	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
MID-A	3.7369E+04	-29.02	3.2679E+04	-1.8125E+04
MID-B	3.7369E+04	-149.02	-3.2036E+04	-1.9238E+04
MID-C	3.7369E+04	90.98	-6.4235E+02	3.7363E+04
CRUC-A	3.6886E+04	-29.43	3.2125E+04	-1.8126E+04
CRUC-B	3.6886E+04	-149.43	-3.1760E+04	-1.8758E+04
CRUC-C	3.6886E+04	90.57	-3.6498E+02	3.6884E+04

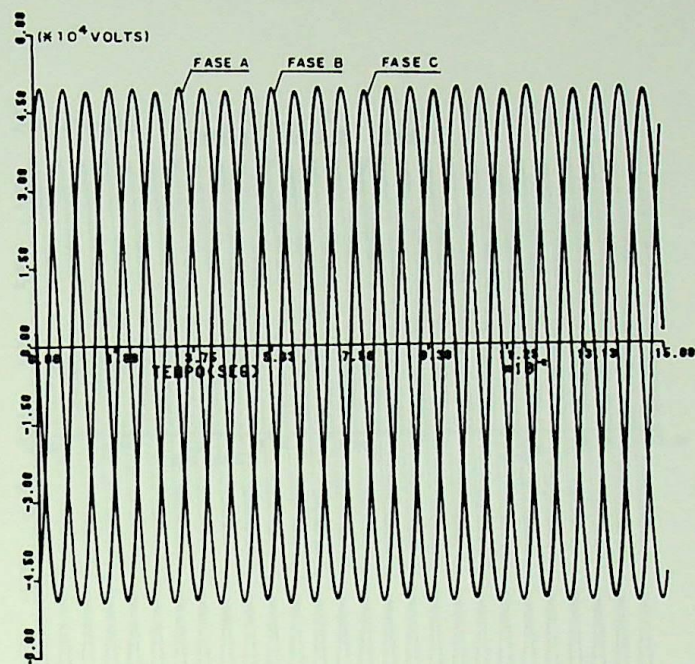
BRANCH CURRENTS(RMS)

FROM	TO	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
PHI-A	KEN-A	2.9542E+02	-70.60	9.8112E+01	-2.7866E+02
PHI-B	KEN-B	2.9542E+02	169.40	-2.9038E+02	5.4361E+01
PHI-C	KEN-C	2.9542E+02	49.40	1.9227E+02	2.2430E+02
KEN-A	SER-A	2.9542E+02	-70.60	9.8112E+01	-2.7866E+02
KEN-B	SER-B	2.9542E+02	169.40	-2.9038E+02	5.4361E+01
KEN-C	SER-C	2.9542E+02	49.40	1.9227E+02	2.2430E+02
CRUC-A	TRF-A	2.9542E+02	-70.60	9.8112E+01	-2.7866E+02
CRUC-B	TRF-B	2.9542E+02	169.40	-2.9038E+02	5.4361E+01
CRUC-C	TRF-C	2.9542E+02	49.40	1.9227E+02	2.2430E+02

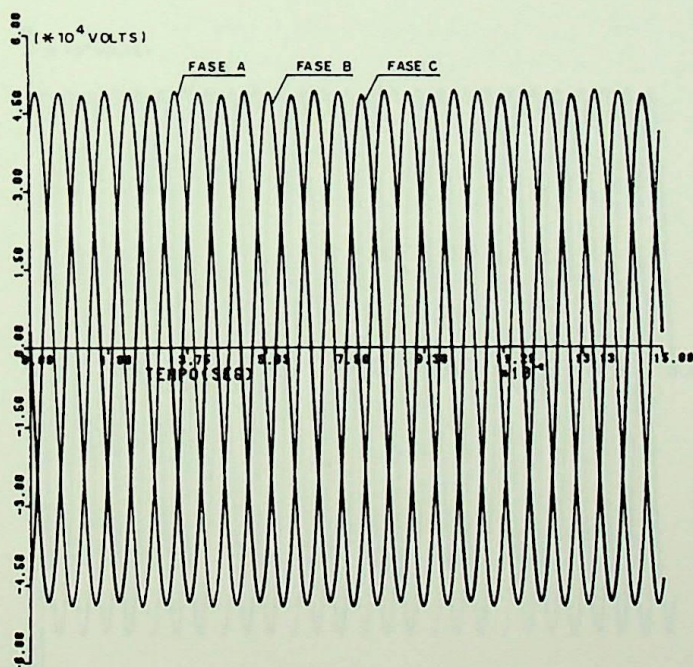
POWER

FROM	TO	REAL POWER	REACTIVE POWER	APPARENT POWER
PHI-A	KEN-A	8.5467E+06	7.0131E+06	1.1056E+07
PHI-B	KEN-B	8.5467E+06	7.0131E+06	1.1056E+07
PHI-C	KEN-C	8.5467E+06	7.0131E+06	1.1056E+07
KEN-A	SER-A	8.3207E+06	6.3451E+06	1.0464E+07
KEN-B	SER-B	8.3207E+06	6.3451E+06	1.0464E+07
KEN-C	SER-C	8.3207E+06	6.3451E+06	1.0464E+07
CRUC-A	TRF-A	8.2028E+06	7.1735E+06	1.0897E+07
CRUC-B	TRF-B	8.2028E+06	7.1735E+06	1.0897E+07
CRUC-C	TRF-C	8.2028E+06	7.1735E+06	1.0897E+07

Tabela 4.5 - Resultados de Regime Permanente do Caso 6

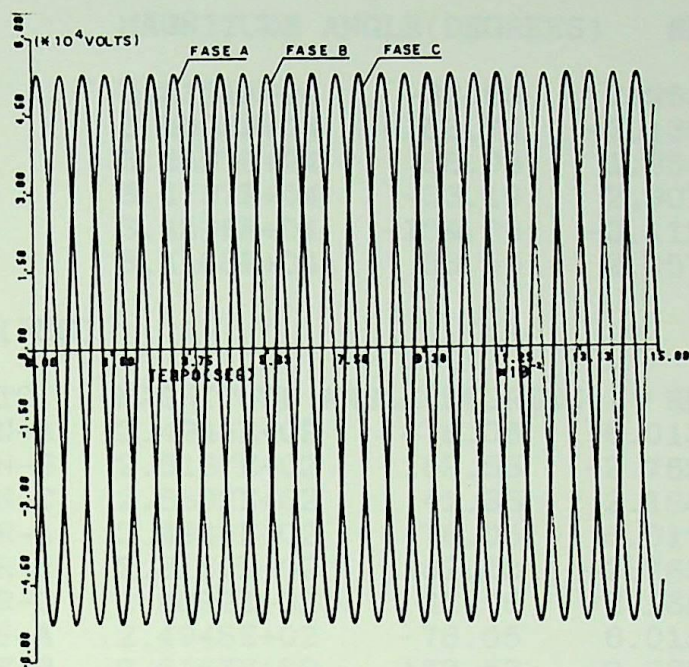


(a) Tensões na barra MID

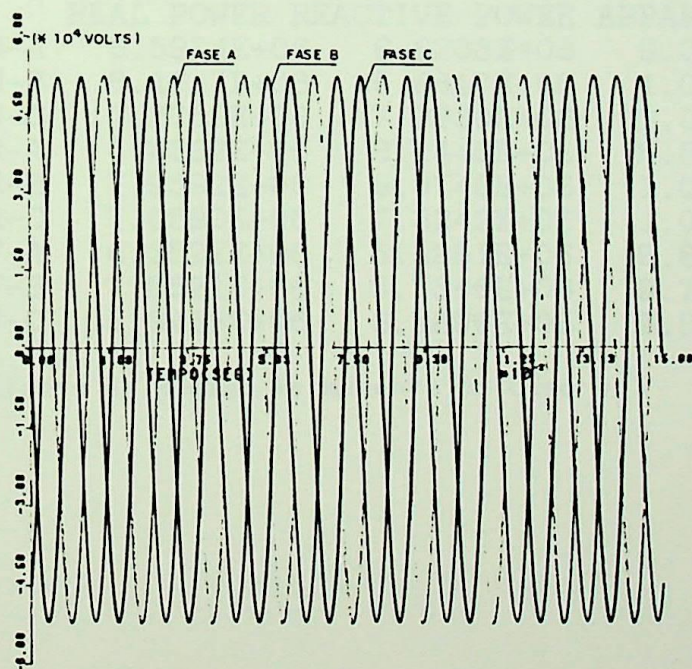


(b) Tensões na barra CRUC

Figura 4.19 - Formas de onda das tensões no tempo para o CASO 7



(a) Tensões na barra MID



(b) Tensões na barra CRUC

Figura 4.20 - Formas de onda das tensões no tempo (CASO 8)

CASO 3 - S/COMPENSADOR SERIE - CARGA DESEQUILIBRADA

STEADY STATE CALCULATIONS COMPLETE.

STEADY STATE SOLUTION

NODE VOLTAGES(RMS)

NAME	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
MID-A	3.5151E+04	-32.83	2.9536E+04	-1.9059E+04
MID-B	3.5003E+04	-153.74	-3.1390E+04	-1.5488E+04
MID-C	3.4597E+04	86.93	1.8540E+03	3.4547E+04
CRUC-A	3.4737E+04	-33.19	2.9070E+04	-1.9015E+04
CRUC-B	3.4566E+04	-154.23	-3.1128E+04	-1.5030E+04
CRUC-C	3.4108E+04	86.54	2.0572E+03	3.4046E+04

BRANCH CURRENTS(RMS)

FROM	TO	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
PHI-A	KEN-A	2.4948E+02	-76.05	6.0136E+01	-2.4212E+02
PHI-B	KEN-B	2.8167E+02	169.53	-2.7697E+02	5.1195E+01
PHI-C	KEN-C	2.8892E+02	41.36	2.1684E+02	1.9093E+02
KEN-A	SER-A	2.4948E+02	-76.05	6.0136E+01	-2.4212E+02
KEN-B	SER-B	2.8167E+02	169.53	-2.7697E+02	5.1195E+01
KEN-C	SER-C	2.8892E+02	41.36	2.1684E+02	1.9093E+02
CRUC-A	TRF-A	2.4948E+02	-76.05	6.0136E+01	-2.4212E+02
CRUC-B	TRF-B	2.8167E+02	169.53	-2.7697E+02	5.1195E+01
CRUC-C	TRF-C	2.8892E+02	41.36	2.1684E+02	1.9093E+02

POWER

FROM	TO	REAL POWER	REACTIVE POWER	APPARENT POWER
PHI-A	KEN-A	6.5974E+06	6.6208E+06	9.3467E+06
PHI-B	KEN-B	8.1647E+06	6.6817E+06	1.0550E+07
PHI-C	KEN-C	7.2752E+06	7.9630E+06	1.0786E+07
KEN-A	SER-A	6.4362E+06	6.1445E+06	8.8983E+06
KEN-B	SER-B	7.9592E+06	6.0745E+06	1.0012E+07
KEN-C	SER-C	7.0590E+06	7.3242E+06	1.0172E+07
CRUC-A	TRF-A	6.3522E+06	5.8951E+06	8.6662E+06
CRUC-B	TRF-B	7.8521E+06	5.7566E+06	9.7362E+06
CRUC-C	TRF-C	6.9463E+06	6.9896E+06	9.8543E+06

Tabela 4.6 - Resultados de Regime Permanente do Caso 7

CASO4 - C/COMPENSADOR SERIE - CARGA DESEQUILIBRADA

STEADY STATE CALCULATIONS COMPLETE.

STEADY STATE SOLUTION

NODE VOLTAGES(RMS)

NAME	MAGNITUDE	ANGLE(DEGREES)	REAL	IMAGINARY
MID-A	3.7460E+04	-29.09	3.2736E+04	-1.8209E+04
MID-B	3.7303E+04	-149.10	-3.2007E+04	-1.9158E+04
MID-C	3.7375E+04	91.12	-7.2877E+02	3.7368E+04
CRUC-A	3.7018E+04	-29.44	3.2238E+04	-1.8195E+04
CRUC-B	3.6837E+04	-149.59	-3.1768E+04	-1.8648E+04
CRUC-C	3.6847E+04	90.73	-4.6973E+02	3.6844E+04

BRANCH CURRENTS(RMS)

FROM	TO	MAGNITUDE	ANGLE(°DEGREES)	REAL	IMAGINARY
PHI-A	KEN-A	2.6598E+02	-72.32	8.0781E+01	-2.5342E+02
PHI-B	KEN-B	3.0063E+02	174.20	-2.9909E+02	3.0359E+01
PHI-C	KEN-C	3.1211E+02	45.62	2.1831E+02	2.2306E+02
KEN-A	SER-A	2.6598E+02	-72.32	8.0781E+01	-2.5342E+02
KEN-B	SER-B	3.0063E+02	174.20	-2.9909E+02	3.0359E+01
KEN-C	SER-C	3.1211E+02	45.62	2.1831E+02	2.2306E+02
CRUC-A	TRF-A	2.6598E+02	-72.32	8.0781E+01	-2.5342E+02
CRUC-B	TRF-B	3.0063E+02	174.20	-2.9909E+02	3.0359E+01
CRUC-C	TRF-C	3.1211E+02	45.62	2.1831E+02	2.2306E+02

POWER

FROM	TO	REAL POWER	REACTIVE POWER	APPARENT POWER
PHI-A	KEN-A	7.4940E+06	6.5698E+06	9.9661E+06
PHI-B	KEN-B	9.2914E+06	6.3758E+06	1.1269E+07
PHI-C	KEN-C	8.4997E+06	7.9689E+06	1.1651E+07
KEN-A	SER-A	7.3108E+06	6.0284E+06	9.4757E+06
KEN-B	SER-B	9.0573E+06	5.6842E+06	1.0693E+07
KEN-C	SER-C	8.2474E+06	7.2234E+06	1.0963E+07
CRUC-A	TRF-A	7.2152E+06	6.6999E+06	9.8462E+06
CRUC-B	TRF-B	8.9353E+06	6.5420E+06	1.1074E+07
CRUC-C	TRF-C	8.1159E+06	8.1480E+06	1.1500E+07

Tabela 4.7 - Resultados de Regime Permanente do Caso 8

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1. COMPENSADOR ESTÁTICO PARALELO ("SHUNT")

Os resultados apresentados, pertinentes as simulações efetuadas no sistema constituído por reatores controlados por tiristores operando em paralelo com capacitores fixos, permitiram avaliar a eficiência do sistema de controle elaborado. Além de corrigir corretamente o consumo de reativos da carga, as três correntes de fase equilibraram-se em valores bastante próximos àquelas esperadas. As tensões também foram reguladas de maneira eficiente, diante da prioridade à compensação da carga, e da não inclusão de função de transferência para o controle destas variáveis.

O dimensionamento dos reatores e capacitores que compoem o compensador mostrou-se também adequado, mesmo para condições extremas de compensação (correção da carga monofásica), próximo dos seus limites de potência reativa.

Os casos apresentados permitiram a fácil observação do "consumo" de reativos pelos componentes harmônicos no sistema elétrico. Através das simulações com o modelo implementado permite-se observar que, para o caso de carga trifásica, embora desequilibrada, os ângulos de ignição dos tiristores do RCT não provocaram grande injeção de harmônicos no sistema de suprimento. No entanto, à medida que eleva-se o desequilíbrio da carga (vide caso monofásico), os componentes harmônicos, principalmente de terceira e quinta ordem, resultam elevado no sistema elétrico. Nesses casos, embora o sistema de controle calcule os ângulos necessários aos disparos dos tiristores do RCT, e envie pulsos de ignição nos instantes apropriados, o equipamento em questão injeta tal ordem de harmônicos de corrente, que o fator de potência resulta inferior a unidade. A necessidade de filtros, nesses casos, é imprescindível.

Cabe lembrar, que os sistemas de controle dos compensadores estáticos do tipo simulado, são funções complexas, dominadas por alguns poucos fabricantes, tais como: Asea Brown Boveri, Haefely, Toshiba, etc. A sua performance, é também dependente da função de transferência para o controle da tensão, e a sua implementação, no sistema elaborado, é de fácil concepção, e fica como sugestão para futuros trabalhos. Além disso, a partir do modelo do circuito de potência utilizado, torna-se simples a inclusão de filtros para os harmônicos preponderantes, como também elaborar-se modelos mais completos, tanto para o sistema elétrico, quanto para o compensador estático.

5.2. COMPENSADOR SÉRIE

Pelas simulações efetuadas no item anterior, observa-se a benéfica influência dos capacitores série instalados em alimentadores de distribuição. As melhoras introduzidas na regulação da tensão, a queda do desequilíbrio entre as tensões de fase, bem como a elevação do fator de potência da instalação, aconteceram em valores bastante significativos. Os resultados obtidos permitem incluir esse equipamento entre os mais eficientes na correção de tensão de flicker de cargas indutivas e variáveis.

A modelagem dos componentes do sistema elétrico podem, com relativa simplicidade, serem realizados de forma mais completa a modelagem dos capacitores série. Nesse caso, especial atenção poderá ser dada aos modelos dos sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada ("Flexible AC Transmission Systems - FACTS"). Assim, como sugestão para futuros trabalhos, pode-se desenvolver uma melhor representação das linhas de distribuição, transformadores do sistema, bem como dos equipamentos de proteção e controle (FACTS) dos capacitores série, fundamental na análise da resposta do compensador quando de situações de anormalidades no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sharon, D. - "Reactive-Power Definitions and Power-Factor Improvement in Non-linear Systems"
Proceedings IEE, Vol. 120, n 6, pp. 704-706, June 1973
- [2] Shepherd, W.; Zakikhani, P. - "Reactive-Power Definitions and Power-Factor Improvement in Non-linear Systems"
Discussion on Proc. IEE, Vol. 120, n^o 6, pp. 704-706
Proc. IEE, Vol. 121, n^o 5, pags. 390-392, May 1974
- [3] Controle e Regulação de Acionamentos Elétricos em Corrente Alternada
Informativo Técnico Siemens, Vol. X
- [4] Kimbark, E. W. - "Direct Current Transmission", Volume 1
New York: John Wiley, 1971
- [5] Cogo, J. R. - "Compensadores Estáticos"
Curso de Pós-graduação, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1991
- [6] Ellery F, E.H. - "Modelagem de Compensadores Estáticos para Estudos Dinâmicos à Frequência Industrial"
Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá, 1985
- [7] Barnes, H.C. - "Modelling of Static Shunt Var Systems (SVS) for Systems Analysis"
Working Group 01 of Study Committee n^o 31 (Transmission Systems) of CIGRE Review Electra, n 51, pp.45-74, March, 1977
- [8] Gyugyi, L.; Otto, R.A.; Putman, T.H. - "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators"
IEEE Transactions On PAS, Vol. PAS-97, n 5, Sept/Oct, 1978

1978, pp. 1935-1945

- [9] Gheth, G.; Enstedt, P.; Rey, A.; Menzies, R.W. - "Individual Phase Control of a Static Compensation and Voltage Balancing and Regulation"
IEEE Transactions On Power Systems, Vol. PWRS-2, N 4
pp. 898-905, Nov. 1987
- [10] Butler, J.W.; Concordia, C. - "Analysis of Series Capacitor Application Problems"
AIEE Transactions, Vol. 56, 1937, pp. 975-988
- [11] Nickle, C.A.; Pierce, C.A. - "Stability Of Synchronous Machines As Affected By Armature Resistance"
AIEE Transactions, Vol. 49, June 1930, pp. 338-350
- [12] Wagner, C.F. - "Self-Excitation Of Induction Motors With Series Capacitor"
AIEE Transactions, Vol. 60, 1941, pp. 1241-1247
- [13] Jones, B.M.; Arthur, J.M.; Stearns, C.M.; Johnson, A.A. - "A
"A 10000-KVA Series Capacitor Improves Voltage on 66-KV Line Supplying Large Electric Furnace Load"
AIEE Transactions, Vol. 67, 1948, pp. 345-354
- [14] "Series Capacitors for Distribution Networks", General Information About Series Compensation and Description of Minicap, ABB Power Systems, Sweden, Reactive Power Compensation Division
- [15] Dommel, H.W.
"Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single And Multiphase Networks"
IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-88, pp. 388-399, April 1969

- [16] Dommel, H.W.; Dommel, I.I. - "Transients Program - User's Manual", The University of British Columbia, 1987.
- [17] Marti, J.R.; Lin, J. - "Supression of Numerical Oscillations in the EMTP"
IEEE Transactions Power Systems, Vol. 4 , pp. 739-747, May 1989
- [18] "Adaptive Var Compensator", Catálogo da TRENSE Electric
- [19] AVC (Adaptive Var Compensator). Useful Formulae

APÊNDICE A

CASO 1-RCT C/ CAPACITOR FIXO-BALANC. DE CARGA TRIFASICA
 DeltaT= 5.0000000000E-05 Tmax= 1.5000000000E-01

Harmonics

	TRFA->SVCA	TRFB->SVCB	TRFC->SVCC
Base :	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00
Start :	8.333333333E-02	8.333333333E-02	8.333333333E-02
End :	1.000000000E-01	1.000000000E-01	1.000000000E-01
RMS :	1.03327061E+03	1.07332512E+03	9.72785612E+02
	0-6.10698339E+00	-4.77328949E+00	1.08804948E+01
1	1.03276242E+03	1.07239128E+03	9.72196817E+02
	43.57	168.60	-71.85
2	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
3	2.43	3.74	1.60
	87.11	260.37	69.45
4	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
5	1.78	1.77	2.85
	57.97	-26.33	195.03
6	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00

Tabela 1 - Harmonicos de Corrente presentes nas correntes de fase compensadas - Caso 1 (RCT/CAPACITOR FIXO)

CASO 2-RCT C/ CAPACITOR FIXO-BALANC. DE CARGA BIFASICA
 DeltaT= 5.0000000000E-05 Tmax= 1.5000000000E-01

Harmonics

	TRFA->SVCA	TRFB->SVCB	TRFC->SVCC
Base :	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00
Start :	8.333333333E-02	8.333333333E-02	8.333333333E-02
End :	1.000000000E-01	1.000000000E-01	1.000000000E-01
RMS :	6.53935233E+02	6.45390009E+02	6.70765378E+02
0	1.27433389E+00	7.85289147E+00	-9.12717930E+00
1	6.23672421E+02	6.44489537E+02	6.47614693E+02
	47.35	165.96	-71.76
2	0.00	1.43	0.00
	0.00	71.98	0.00
3	31.27	4.40	26.88
	77.48	218.09	263.42
4	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
5	3.88	2.22	1.57
	73.18	259.71	243.96
6	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00

Tabela 2 - Harmonicos de Corrente presentes nas correntes de fase compensadas - Caso 2 (RCT/CAPACITORES FIXOS)

CASO 3 - RCT C/ CAPACITOR FIXO-BALANC.DE CARGA MONOFASICA
 DeltaT= 5.0000000000E-05 Tmax= 1.5000000000E-01

Harmonics

	TRFA->SVCA	TRFB->SVCB	TRFC->SVCC
Base :	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00
Start :	8.333000000E-02	8.333000000E-02	8.333000000E-02
End :	1.000000000E-01	1.000000000E-01	1.000000000E-01
RMS :	5.19141463E+02	3.76464503E+02	4.79462284E+02
0	1.35104615E+00	7.71438444E+00	-9.06544489E+00
1	3.80221468E+02	3.68254426E+02	3.24337358E+02
	38.35	167.03	-79.22
2	4.63	0.00	4.52
	40.95	0.00	221.64
3	92.80	20.55	108.56
	74.85	171.58	267.18
4	1.29	1.08	2.57
	235.46	-83.70	73.58
5	2.48	4.56	5.18
	55.56	-50.56	161.99
6	0.00	0.00	1.09
	0.00	0.00	79.95
7	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00

Tabela 3 - Harmonicos de corrente presentes nas correntes de fase compensadas - Caso 3 (sistema fraco)

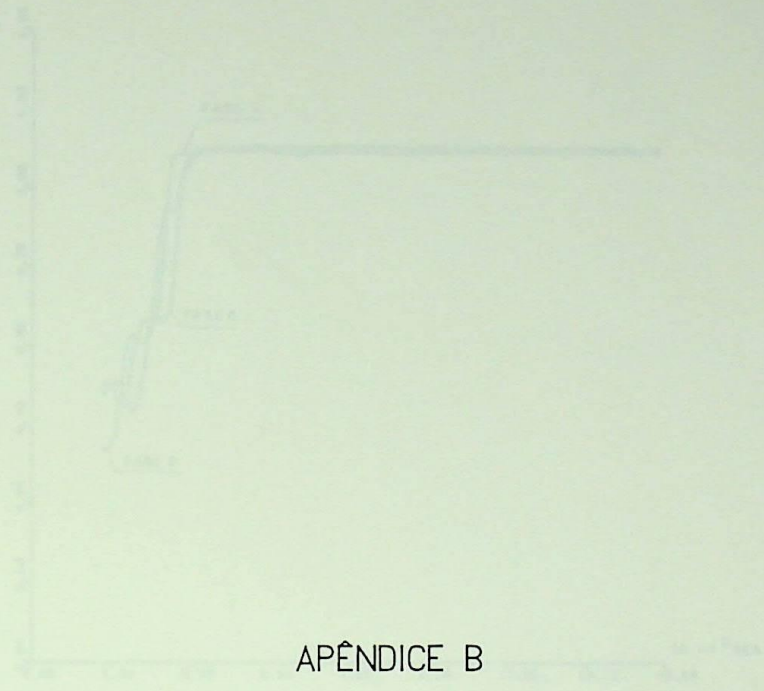
CASO 3 - RCT C/ CAPACITOR FIXO-BALANC.DE CARGA MONOFASICA
 DeltaT= 5.0000000000E-05 Tmax= 1.0000000000E-01

Harmonics

	TRFA->SVCA	TRFB->SVCB	TRFC->SVCC
Base :	1.000000000E+00	1.000000000E+00	1.000000000E+00
Start :	8.333000000E-02	8.333000000E-02	8.333000000E-02
End :	1.000000000E-01	1.000000000E-01	1.000000000E-01
RMS :	3.82148167E+02	3.63007812E+02	3.90762471E+02
	0-7.02807162E+00	7.06536079E+00	-3.72779972E-02
1	3.45212634E+02	3.55047853E+02	3.46799757E+02
	22.38	143.03	264.12
2	1.46	1.37	2.20
	-60.08	220.65	81.12
3	41.73	1.92	43.43
	269.81	-73.56	90.56
4	1.16	0.00	1.17
	-38.35	0.00	118.28
5	16.05	17.69	23.67
	229.82	137.52	-0.06
6	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
7	8.27	10.02	7.74
	34.44	262.41	134.63
8	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
9	10.14	1.18	11.29
	73.39	64.70	252.47
10	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
11	5.41	3.03	4.39
	217.20	-17.43	72.33
12	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
13	5.62	2.88	3.78
	-61.58	79.67	147.63
14	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
15	1.61	1.25	0.00
	89.61	-89.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
17	1.71	1.49	3.17
	175.85	197.09	5.90
18	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
19	1.38	1.29	1.62
	15.08	269.03	143.75
20	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	1.86
	0.00	0.00	269.98
22	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00
23	1.48	0.00	0.00
	240.75	0.00	0.00

Tabela 4 - Harmonicos de corrente presentes nas correntes compensadas de fase - caso 3 (sistema forte)

CASO 1



APÊNDICE B

Figura 1 - Variação de potencial das lâmpadas

CASO 2



Figura 2 - Variação de potencial das lâmpadas

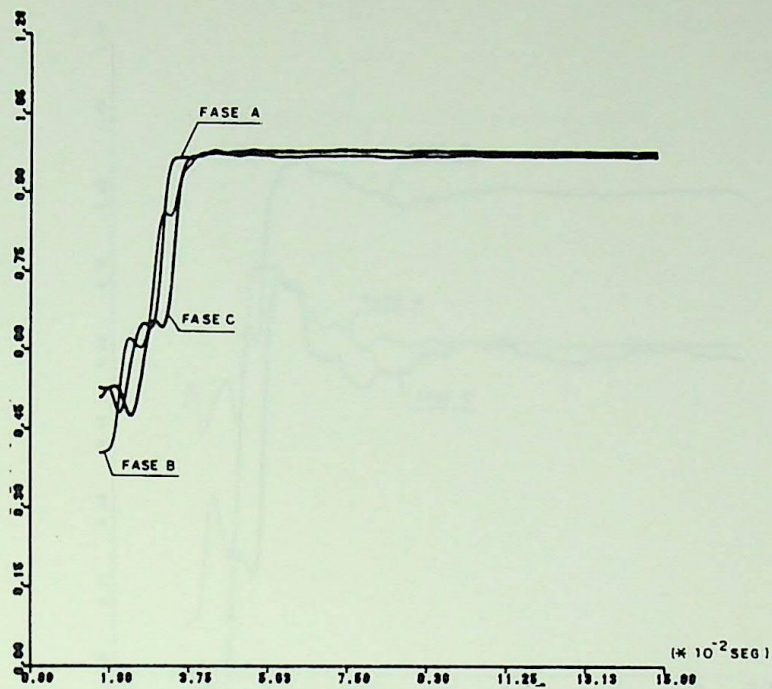
CASO 1

Figura 1 - Fator de potência das fases

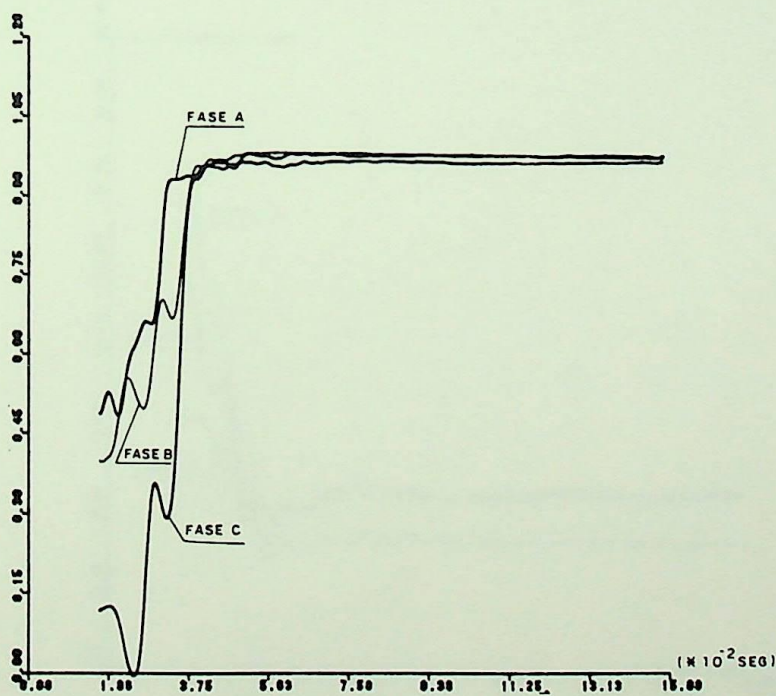
CASO 2

Figura 2 - Fator de potência das fases

CASO 3

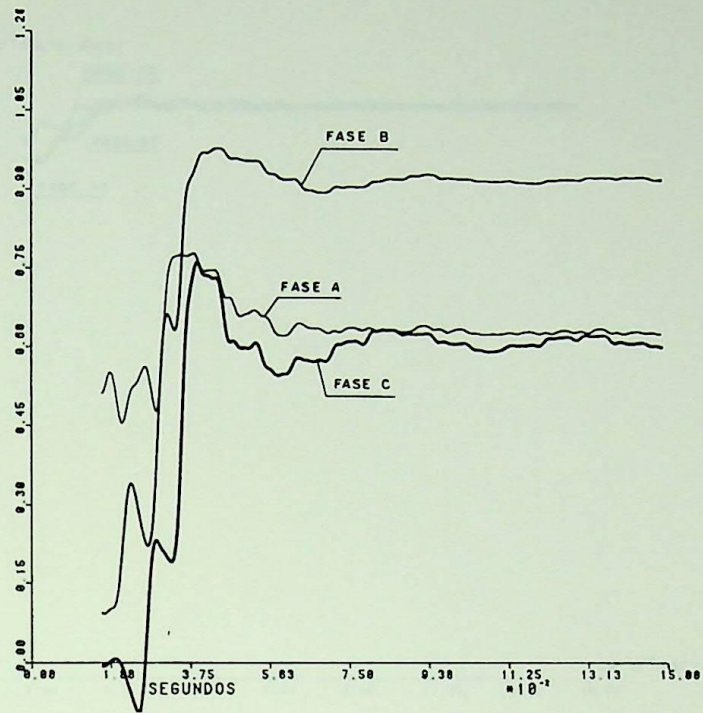


Figura 3 - Fator de potência das fases

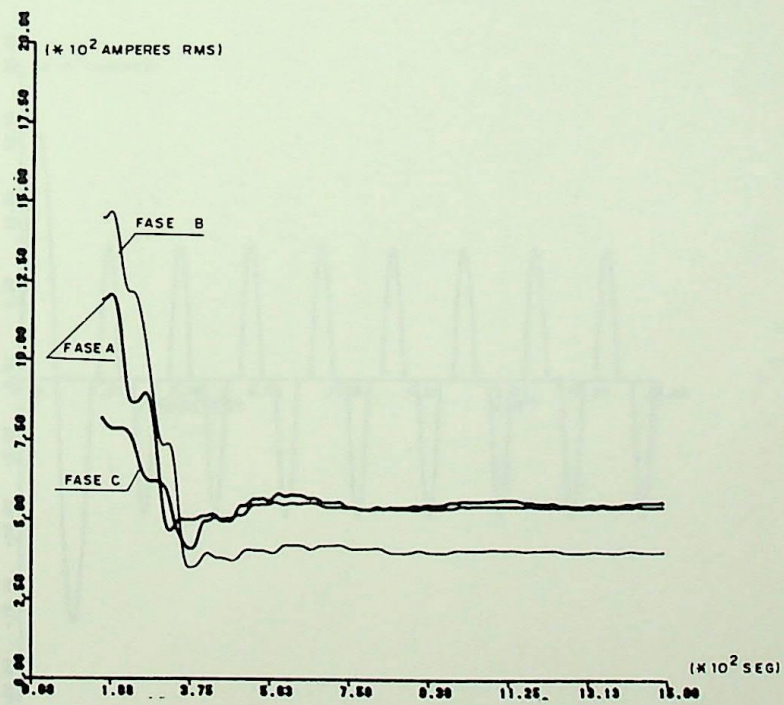


Figura 4 - Correntes compensadas de fase

CASO 3 (CONTINUAÇÃO)

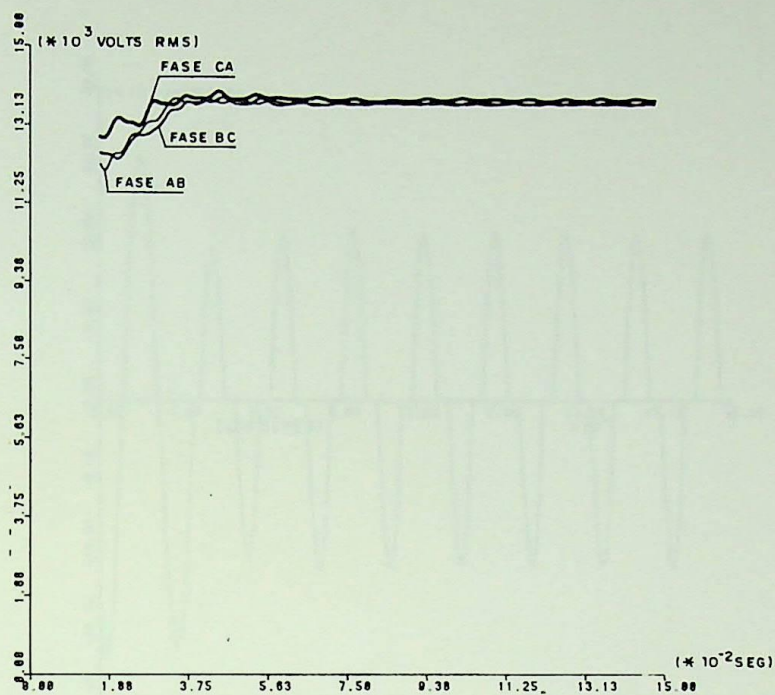


Figura 5 - Tensões rms compensadas

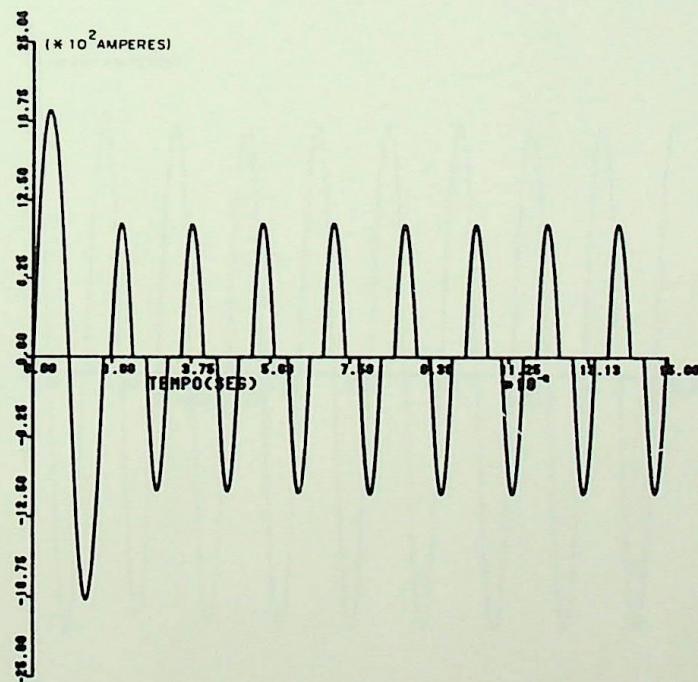


Figura 6 - Corrente no tempo reator AB

CASO 3 (CONTINUAÇÃO)

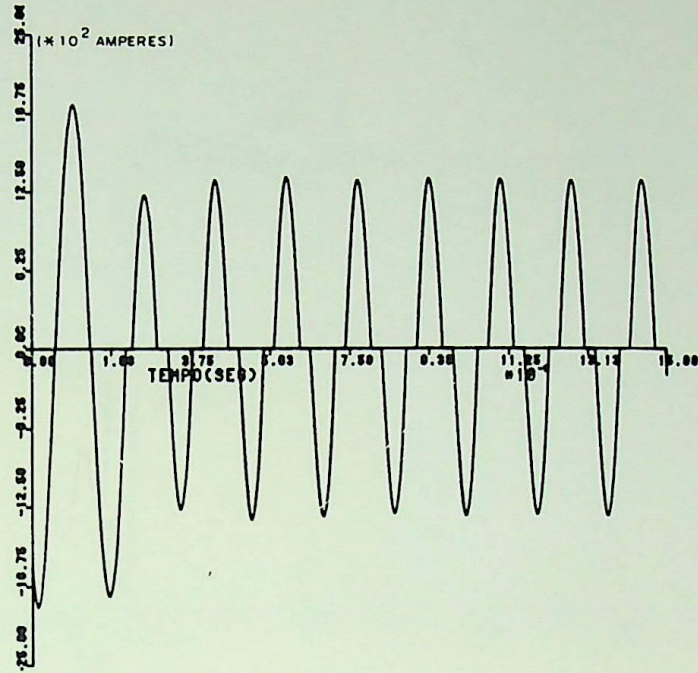


Figura 7 - Corrente no tempo reator BC

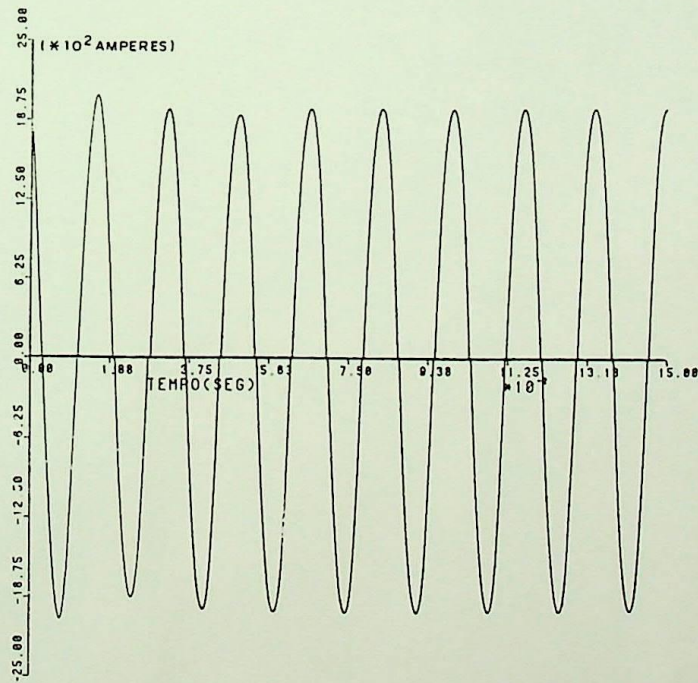


Figura 8 - Corrente no tempo reator CA

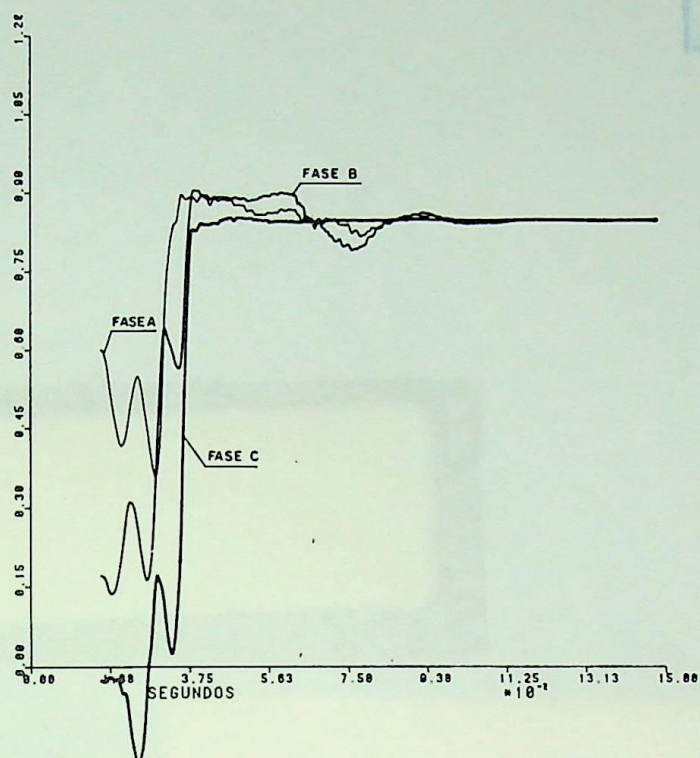
CASO 4

Figura 9 - Fator de potência das fases

DATA 19/01 / 1995
 PROC. _____
 PED. PPG
 LIV. _____
 Cz\$ JORÇÃO

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
 8200774

 NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

FICHA 01 T.774
EFEI / Biblioteca Mauá
 621.372.55:621.31(043.2)
 048a

 OLIVEIRA, H. R. P. M. de
 Aplicações de compensadores
 estáticos em sistemas elétricos.

Data da	N.º Registro	Data Devol
25	Elizete Letol Mauá	

EFEI
BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida
 dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação
 em seu poder.