

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001038



Nº 11

CAPACITORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS POLUÍDOS
ALUNO: MARIA ISABEL CUENCA ALEGRIA
ORIENTADOR: LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Te.1038

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAPACITORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS POLUÍDOS

1210001038



"Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira - Unesp, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica"

1210001038



Aluno: María Isabel Cuenca Alegria

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira

Ilha Solteira/Dezembro 96

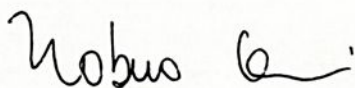
Proc. 233/97 - NAD 116/97 MFM-486

UNESP - "CAMPUS" DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO DE BIBLIOTECARIA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE RECEBIMENTO 03.07.97	DATA DE TURNO 30.07.97
REGISTRO e	TURNO Te. 1038
ACQUISIÇÃO 10.20 Autor	CLASSIFICAÇÃO 621.31 A 366c

CAPACITORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS POLUÍDOS

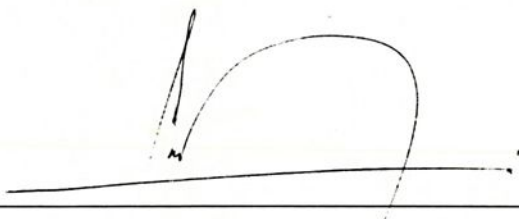
MARÍA ISABEL CUENCA ALEGRÍA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA - UNESP, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

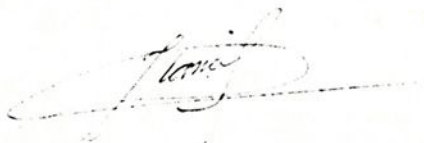


NOBUO OKI, D.Sc - COORDENADOR

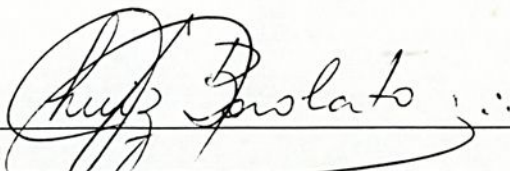
COMISSÃO EXAMINADORA



LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA, D.Sc. - ORIENTADOR



JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES, D. Sc.



LUIZ FERNANDO BOVOLATO, D.Sc.

ILHA SOLTEIRA, DEZEMBRO DE 1996

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira, pela orientação e sugestões na execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi e a sua esposa Marli pelo apoio e amizade à minha chegada a Ilha Solteira.

A Getulio Mendes dos Santos por sua valiosa e constante ajuda.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica que de uma forma ou de outra auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

A meus colegas de curso, especialmente João Ricardo Duran e Pedro Gameiro Lopes pelo apoio e amizade.

A Deoclécio Mitsuiti Kosaka pela orientação e ajuda na área de informática.

A minha amiga Inês por dividir comigo seus problemas e alegrias durante este tempo.

A meus amigos Julio, Ana, Alexis, Yin e tantos outros que com sua confiança e carinho me ajudaram a chegar até aqui.

A Deus.



Atualmente no Brasil o controle do fator de potência tem merecido uma constante atenção por parte dos consumidores industriais e pelas concessionárias de energia elétrica. Neste contexto, a crescente utilização de bancos de capacitores nos atuais sistemas elétricos industriais sujeitos a distorções harmônicas tem provocado inúmeras ocorrências indesejáveis nos diferentes componentes dos sistema elétrico e particularmente nos próprios capacitores, como por exemplo a queima excessiva de fusíveis, aquecimento generalizado, envelhecimento precoce e até mesmo explosão.

Neste trabalho analisa-se os principais problemas associados ao funcionamento dos bancos de capacitores em sistemas elétricos poluídos e apresenta-se sugestões e recomendações para a minimização dos efeitos decorrentes desta condição operativa.



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	01
-------------------------	-----------

CAPÍTULO 2

FLUXO HARMÔNICO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	03
2.1 - INTRODUÇÃO	03
2.2 - MODELAGEM DAS FONTES HARMÔNICAS	04
2.3 - MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS DE BARRA	04
2.3.1 - Modelos dos componentes dos sistemas elétricos	05
2.3.1.1 - Equivalentes de sistemas	05
2.3.1.2 - Linhas e cabos	07
2.3.1.3 - Transformadores	07
2.3.1.4 - Cargas	09
2.3.1.5 - Máquinas síncronas	11
2.3.1.6 - Capacitores	13
2.3.1.7 - Reatores	13
2.4 - EXEMPLO DE FLUXO HARMÔNICO	14
2.4.1 - Dados do sistema elétrico simulado	14
2.4.2 - Procedimento utilizado	18
2.4.2.1 - Resultados obtidos	18

CAPÍTULO 3

EFEITOS DOS HARMÔNICOS SOBRE OS CAPACITORES	23
3.1 - INTRODUÇÃO	23
3.2 - PERDAS	23
3.3 - NORMAS E RECOMENDAÇÕES	25
3.4 - RESSONÂNCIAS	26
3.4.1 - Ressonância série	26
3.4.2 - Ressonância paralela	27
3.4.3 - As ressonâncias nos sistemas de potência	28
3.5 - PROTEÇÃO	31



3.5.1 - Índice de distorção	32
3.5.2 - Metodologia para minimização da operação inadequada da proteção	35
3.5 - VIBRAÇÕES E RUÍDOS	37

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL	40
4.1 - INTRODUÇÃO	40
4.2 - SOFTWARE DE APOIO	40
4.3 - SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL.....	40

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	50
---	-----------

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFIA	53
---------------------------	-----------

Os engenheiros responsáveis pela operação e manutenção dos sistemas de potência tem se ocupado ao longo dos anos com problemas relativos ao controle da tensão, correção do fator de potência, surtos e transitórios de chaveamento desde a implantação dos primeiros sistemas de distribuição por volta de 1900.

O consumo de energia elétrica nos Estados Unidos hoje está na ordem de $600 \cdot 10^9$ kWh/ano. Deste consumo, cerca de 70% a 80% são motores elétricos e o restante está dividido entre iluminação e outras cargas [07]. Com os constantes avanços tecnológicos ligados a área de eletrônica de potência, os acionamentos elétricos de grande parte destes motores estão sendo substituídos por acionamentos eletrônicos baseados em conversores ac-dc. O principal benefício dos acionadores eletrônicos é de natureza econômica e está relacionada não só com o custo total da instalação mas também com redução no consumo de energia elétrica. Tipicamente, as instalações de motores elétricos acionados eletronicamente chegam a apresentar custos entre 20% a 50% menores que as instalações convencionais baseadas em acionamentos eletromecânicos. Até o final da década de 90 estima-se que perto de 400.000 unidades estarão utilizando esta tecnologia e por volta do ano 2000 o potencial energético economizado resultante do uso e operação de acionamentos eletrônicos deverá chegar a 170×10^9 KWh/ano.

De fato este tipo de acionamento traz importantes benefícios econômicos entre outros [07]. Entretanto, os conversores ac-dc utilizados nestes dispositivos como interface com o sistema de suprimento absorvem correntes não senoidais .

Em um sistema elétrico de potência, a presença de correntes e/ou tensões distorcidas podem causar além da indução de ruído em sistemas de comunicação, sinalização e controle, uma série de outros problemas, como o aumento das perdas nos equipamentos elétricos, a redução da eficiência de motores de corrente alternada, o aumento da demanda de potência reativa, o aumento da necessidade de investimentos para os sistemas, a redução na qualidade de determinados produtos industriais, o aumento nos custos de manutenção, erros em medidores de energia elétrica, assim como falhas de alguns equipamentos sujeitos à sobretensões harmônicas devido a ressonância [14].

Neste contexto, os capacitores utilizados para correção do fator de potência tem uma importância decisiva. Estes componentes apresentam reatâncias, cujos valores variam de forma



inversa com a frequência, que em conjunto com os demais componentes do sistema elétrico formam ressonâncias para uma ou mais frequências harmônicas presentes. Quando isto acontece, os equipamentos instalados podem ficar sujeitos a elevados níveis de correntes e/ou tensões que podem acentuar significativamente os efeitos citados anteriormente.

No Brasil, diante das novas diretrizes definidas para o controle do fator de potência, vários bancos de capacitores vem sendo instalados pelos consumidores industriais e pelas concessionárias de energia elétrica. Os benefícios destas ações são naturalmente de grande importância para o setor energético, mas devem ser implementados com muito rigor técnico no sentido de controlar a multiplicação dos pontos de ressonância e minimizar os efeitos nocivos associados à poluição harmônica e particularmente resguardar o funcionamento adequado dos próprios bancos de capacitores.

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de resgatar os principais problemas decorrentes da utilização de capacitores em sistemas elétricos sujeitos a distorções harmônicas e apresentar sugestões e/ou recomendações para o uso adequado de bancos de capacitores no sentido de minimizar os efeitos decorrentes desta condição operativa.

Para atender a proposta deste trabalho, o texto está estruturado em quatro capítulos.

O capítulo 2 tem por objetivo abordar os aspectos gerais de um programa digital para o cálculo do fluxo harmônico em sistemas de potência. Este assunto embora abordado superficialmente é aqui apresentado por se tratar de uma ferramenta indispensável para as análises que se seguem na sequência deste trabalho. É apresentada uma descrição geral dos modelos recomendados para componentes de sistemas elétricos em estudos de fluxo harmônico, bem como as características operacionais das principais fontes geradoras de harmônicas.

No capítulo 3 discute-se os principais problemas relativos ao uso de capacitores em sistemas elétricos sujeitos a distorções harmônicas. São analisados os principais aspectos envolvendo funcionamento dos bancos de capacitores destacando o comportamento das perdas e degradação de vida útil, a formação de ressonâncias, a atuação da proteção e a produção de ruídos e vibrações..

No capítulo 4 apresenta-se alguns resultados práticos obtidos a partir de um sistema hipotético com o objetivo de ilustrar alguns efeitos descritos no capítulo 3.

As conclusões e recomendações oriundas deste trabalho, bem como algumas sugestões para futuras investigações são apresentadas no capítulo 5.



2.1 - INTRODUÇÃO

Com o aparecimento cada vez mais freqüente de cargas não-lineares nos sistemas elétricos de potência, absorvendo correntes não senoidais, torna-se necessário análises complementares no planejamento dos sistemas, de maneira a se compreender e minimizar os efeitos causados pelas distorções harmônicas. Entre os métodos utilizados para estas análises estão os programas computacionais que determinam as correntes harmônicas nos ramos e as tensões distorcidas nos barramentos, avaliando portanto o fluxo harmônico no sistema.

É possível identificar na literatura alguns métodos básicos para a avaliação das distorções de tensões e correntes nos sistemas de energia elétrica. Estes métodos estimam as distorções presentes no sistema utilizando técnicas de cálculo no domínio do tempo ou no domínio da freqüência. A investigação no domínio do tempo consiste na solução de um conjunto de equações diferenciais utilizando métodos numéricos. Tem como vantagem a previsão do comportamento transitório do sistema, sendo que os valores das tensões e das correntes são determinados ponto a ponto, num dado período. A grande dificuldade deste método de análise de distorção é que o resultado é fortemente dependente do passo escolhido na solução numérica. Desta forma, para uma maior precisão, necessita-se de maior capacidade de memória e maiores esforços computacionais para a obtenção dos resultados desejados.

A investigação no domínio da freqüência, por sua vez, trata o sistema na condição de regime permanente. Baseado pois no princípio da superposição de efeitos as correntes e tensões são determinadas individualmente para cada freqüência harmônica de excitação.

Uma vez que a maioria dos problemas envolvendo distorções harmônicas restringem-se a situações de regime permanente, e por ser a investigação no domínio da freqüência muito eficiente e de simples implementação computacional, os programas comerciais para cálculo do fluxo harmônico, tem seguido esta metodologia. Neste contexto, a metodologia de cálculo mais utilizada é baseada na injeção de correntes e determinação das tensões harmônicas de acordo com a expressão 2.1.



$$\hat{V}_n = [Z_{bus}]_n \cdot \hat{I}_n \quad (2.1)$$

onde:

$[Z_{bus}]_n$ - matriz de impedâncias de barra para a ordem harmônica n ;

$\hat{V}_n$ - vetor das tensões nas barras para a ordem harmônica n ;

$\hat{I}_n$ - vetor das correntes nas barras para a ordem harmônica n .

A solução do sistema de equações baseado na expressão 2.1 é feita considerando-se inicialmente dois procedimentos básicos:

- determinação da matriz de impedâncias de barra harmônica $[Z_{bus}]_n$;
- determinação do vetor de correntes harmônicas injetadas $\hat{I}_n$.

2.2 - MODELAGEM DAS FONTES HARMÔNICAS - $\hat{I}_n$

As fontes de harmônicas, são representadas como fontes ideais de corrente. As componentes harmônicas podem ser obtidas por medição direta ou através de modelos matemáticos adequados para as diferentes cargas elétricas especiais.

Nas versões mais simples, o vetor de correntes harmônicas injetadas é montado a partir de dados obtidos por meio de medição ou previamente conhecidos. Este procedimento muitas vezes não é recomendado, principalmente porque não permite investigar as interações entre as fontes geradoras de harmônicas com os demais componentes do sistema.

Nas versões mais elaboradas o vetor de correntes harmônicas é determinado durante o processo de simulação digital do fluxo harmônico, utilizando-se para isto modelagens específicas para cada tipo de fonte geradora de harmônicas, [03] e [05].

2.3- MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS DE BARRA - $[Z_{bus}]_n$

Para a montagem da matriz de impedâncias de barra $[Z_{bus}]_n$, normalmente considera-se o sistema elétrico simétrico e equilibrado, representando-se portanto apenas uma das fases. A matriz de impedâncias de barra para cada componente harmônica é obtida através das metodologias conhecidas em estudos de curto-circuito, ou seja, por algoritmos de montagem direta ou pela inversão da matriz admitância de barra. Qualquer que seja o procedimento



escolhido, este deve ser aplicado individualmente para cada componente harmônica investigada e nesse sentido é imperativo conhecer o comportamento dos diferentes equipamentos dos sistemas elétricos em função da frequência assim como os seus modelos matemáticos.

2.3.1 - Modelos dos componentes dos sistemas elétricos

2.3.1.1 - Equivalentes de sistemas

De um modo geral os sistemas de distribuição e transmissão apresentam um comportamento notadamente indutivo à frequência fundamental da rede. Deste modo, a utilização de equivalentes de sistemas baseados na potência de curto-circuito pode ser adequada à solução dos problemas envolvendo estes sistemas à frequência fundamental. Entretanto, quando o sistema elétrico fica sujeito a injeções harmônicas é necessário avaliar seu comportamento para cada uma das frequências presentes.

Tomando-se um sistema elétrico numa dada condição de carregamento, a forma típica da impedância equivalente, vista de um dado barramento, em função da frequência, é o apresentado na Figura 2.1. Tal comportamento se justifica devido à complexa topologia do sistema onde se conta com a presença de indutâncias e capacitâncias, além, logicamente, de resistências, em configurações capazes de originar ressonâncias em várias frequências harmônicas.

Basicamente existem dois métodos de se obter os diagramas da figura 2.1. O primeiro método se dá através de medições de campo e o segundo através da simulação digital e/ou analógica do sistema em questão. Ambos os métodos têm restrições quanto à sua aplicação. O primeiro deles supõe a existência física do sistema, enquanto o segundo implica na utilização de modelos adequados para cada um de seus componentes na faixa de frequências de interesse, sendo portanto mais adequado a nível de planejamento.



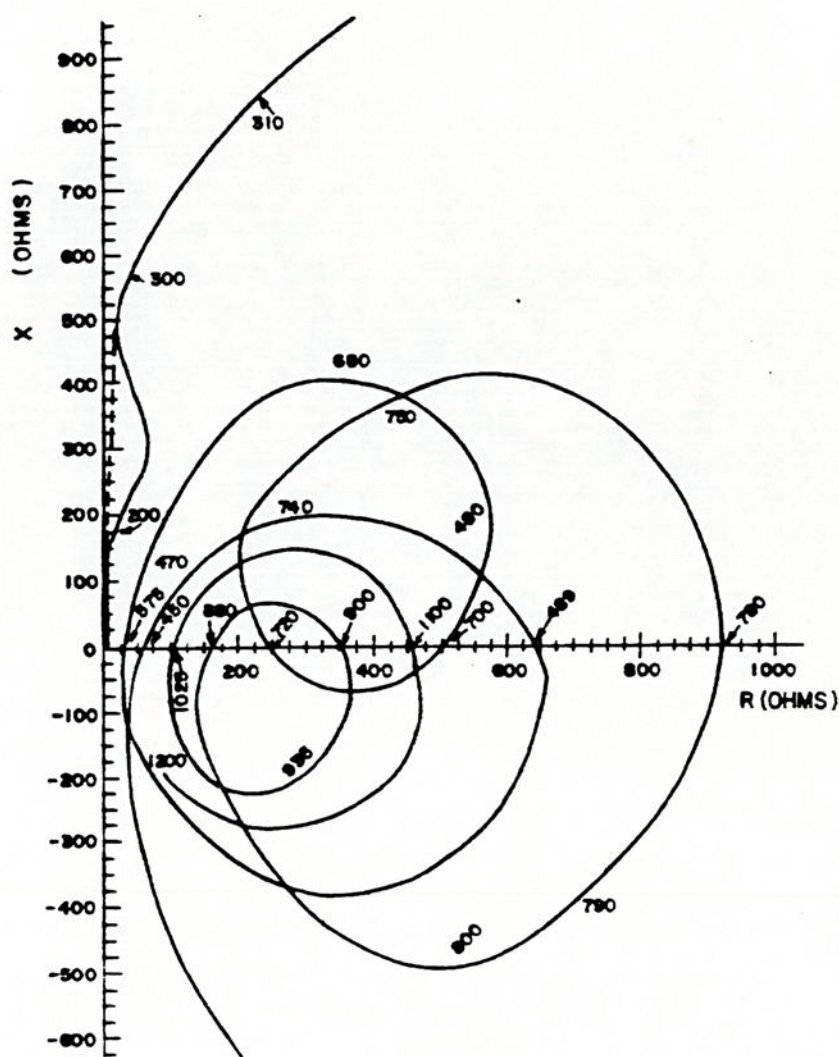


Figura 2.1 - Impedância equivalente de um sistema em função da frequência

Em estudos preliminares o modelo adotado para equivalentes de sistema pode ser baseado na representação da impedância equivalente por sua reatância de curto-circuito corrigida para as frequências harmônicas, conforme sugere a expressão 2.2.

$$\left| Z_{cc}^n \right| = \frac{V^2}{S_{cc}} n \quad \phi_n = 90^\circ \text{ (para qualquer } n \text{)} \quad (2.2)$$

onde: $\left| Z_{cc}^n \right|$ - módulo da impedância harmônica equivalente.

ϕ_n - ângulo da impedância harmônica equivalente.

V - tensão eficaz do barramento.

S_{cc} - potência de curto-circuito do barramento.

n - ordem harmônica.

2.3.1.2 - Linhas e Cabos

As linhas e cabos em estudos envolvendo frequências harmônicas, podem ser representados por um circuito equivalente π compreendendo uma resistência e uma reatância indutiva em série, inseridos entre ambos os pontos da rede e fechados por dois capacitores conectados entre estes pontos e o ponto de referência (terra), conforme mostra a Figura 2.2.

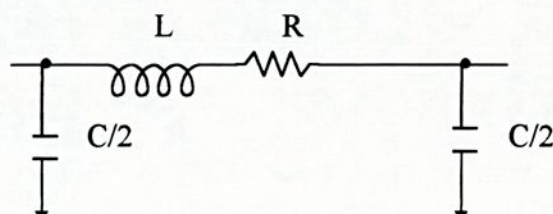


Figura 2.2 - Circuito π equivalente para linhas e cabos

Como uma primeira aproximação pode-se considerar que a resistência e a indutância são independentes da frequência e iguais àquelas a 60 Hz. A capacitância de cada um dos capacitores pode ser considerada igual à metade da capacitância correspondente à potência reativa gerada calculada pelos métodos tradicionais, sem carga e alimentada pela tensão terminal a 60 Hz.

2.3.1.3 - Transformadores

A representação mais simples de um transformador é aquela na qual considera-se apenas a indutância de dispersão, facilmente calculada a partir dos dados de placa do transformador (reatância em p.u.) e a resistência dos enrolamentos, cuja representação por fase é mostrada na Figura 2.3.

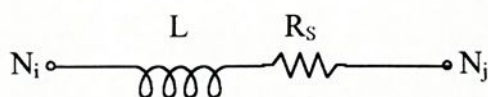


Figura 2.3 - Modelo para transformadores

Como a resistência dos enrolamentos é na maior parte dos casos, de valor bastante pequeno em relação à reatância de dispersão à frequência fundamental, ela pode ser desprezada fazendo-se $R_s = 0$.

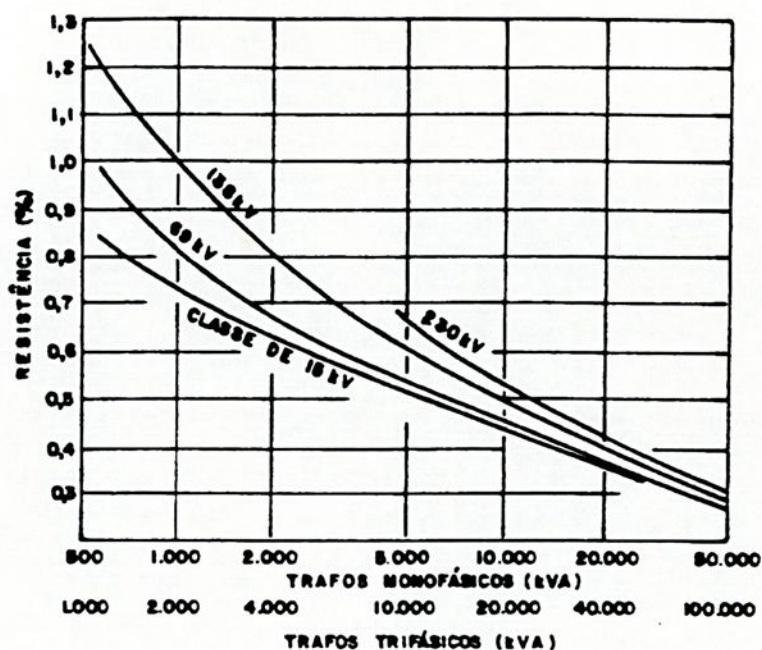


Figura 2.4 - Resistência % de transformadores com refrigeração própria, imersos em óleo.

Outro modelo para representação de transformadores é ilustrado na figura 2.5. Neste caso utiliza-se a reatância de dispersão em paralelo com uma resistência cujo valor é obtido pelo produto entre a reatância de dispersão e um fator de correção. Um valor típico para este fator de correção é 80 [03].

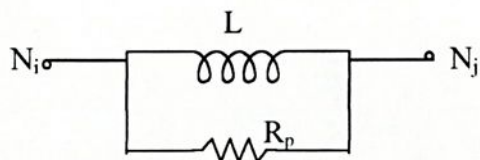


Figura 2.5 - Modelo para transformadores.

Apesar deste modelo ser mais adequado para descrever o comportamento de transformadores à baixas frequências, estes são normalmente adotados para uma primeira avaliação.

2.3.1.4 - Cargas

As cargas ligadas ao sistema de potência têm uma grande importância na característica dos harmônicos da rede. Elas não somente contribuem como o principal elemento de amortecimento, mas podem também afetar as condições de ressonância, particularmente para as altas frequências.

Nos estudos de fluxo harmônico, não é usual representar as cargas de baixa potência individualmente. Estas são geralmente combinadas em circuitos equivalentes que melhor representem as características de impedância do conjunto de cargas. Estes modelos equivalentes são baseados nas composições típicas apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição de cargas

Natureza	Tipo de Carga
Doméstica ou Comercial	Lâmpadas incandescentes Ar condicionado Aquecimento resistivo Exaustores Refrigeradores Maquinas de lavar Lâmpadas fluorescentes * Televisores * Outras cargas eletrônicas *
Industrial	Ventiladores Bombas Compressores Aquecimento resistivo Solda Fornos a arco * Ferrovias * Cargas eletrônicas *(Conversores)

(*) Estas cargas são fontes de frequências harmônicas e assim não podem ser modeladas através de parâmetros constantes R, L ou C. São normalmente representadas como fontes geradoras de harmônicos [3]

Existe uma certa dificuldade em obter informações detalhadas sobre a composição exata das cargas, assim para estudos de penetração harmônica se usam modelos alternativos baseados nas informações disponíveis.

Para uma primeira avaliação em estudos de fluxo harmônico, é comum adotar-se a impedância equivalente total à frequência fundamental, calculada a partir das potências ativa e



reativa dos respectivos conjuntos de cargas. Entretanto em alguns casos, particularmente em cargas envolvendo motores de indução, recomenda-se [03] um tratamento específico. Quando na composição da carga predominam os motores de indução adota-se o modelo ilustrado na figura 2.6.

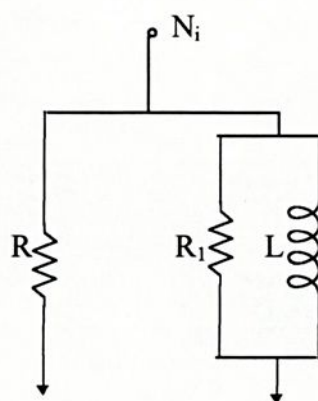


Figura 2.6 - Modelo de cargas

Neste caso os parâmetros do circuito equivalente são calculados a partir de:

$$R = \frac{V^2}{S(1-K)} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{V^2}{1,2KK_1S\omega} \quad (2.4)$$

$$R_1 = \frac{L}{K_2} \quad (2.5)$$

onde:

- S - demanda total em MVA
- K - fração da demanda total correspondente aos motores
- K_1 - severidade da condição de partida [03].
- K_2 - relação entre R e L do motor equivalente
- R - resistência das potências ativas
- R_1 - resistência do motor equivalente (pode ser ignorada)
- L - indutância do motor de indução equivalente
- ω - $2\pi f_{nom}$

Obs: Para cargas industriais $K \cong 0,8$

cargas comerciais/domésticas $K \cong 0,2$

K_1 - entre 4 e 7

$K_2 \cong 0,2$

Quando um grande motor de indução ou grupo de motores são conectados diretamente num nível de tensão de sub-transmissão, o que tipicamente seria o caso de indústrias, a representação mais adequada deste tipo de carga é um circuito série composto por uma resistência e uma indutância, como ilustrado na figura 2.7, [03].

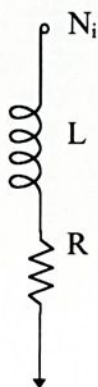


Figura 2.7 - Modelo para motores de indução.

Os parâmetros são obtidos por:

$$R = P_p (MI) / I_n \quad (2.6)$$

$$L = X_{bl} / 2 \pi f_{nom} \quad (2.7)$$

onde:

MI - motor de indução

$P_p (MI)$ - potência devido as perdas no MI (Mw)

I_n - corrente nominal do MI (kA)

X_{bl} - reatância de rotor bloqueado

f_{nom} - frequência nominal

2.3.1.5 - Máquinas síncronas

O comportamento das máquinas síncronas sujeitas à frequências harmônicas é bastante complexo, devido ao modo com que o fluxo magnético no entreferro varia com o tempo. Assim, não é simples o estabelecimento de parâmetros do modelo equivalente destas máquinas.

De um modo geral as publicações sobre o assunto [03] recomendam o uso de uma combinação série de resistências e indutâncias sujeitas a fatores de correção que variam em função das características próprias de cada tipo de máquina. Todavia entre eles é possível destacar dois modelos considerados de uso mais freqüente, ilustrados nas figuras 2.8 e 2.9.

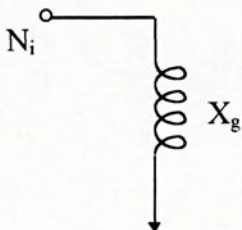


Figura 2.8 - Modelo para máquinas síncronas

O parâmetro X_g é determinado a partir de:

$$X_g = 1/S_{cc}$$

onde: S_{cc} - potência de curto-circuito do gerador em MVA.

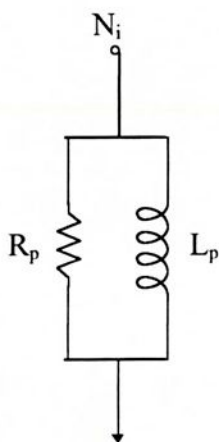


Figura 2.9 - Modelo para máquinas síncronas.

Os parâmetros L_p e R_p do modelo apresentado na figura 2.9 são calculados mediante:

$$L_p = (X''_d + X''_q) / (2 \pi f) \quad (2.8)$$

$$R_p = R_g (h)^{0.96} \quad (2.9)$$

onde:

X''_d - reatância subtransitória de eixo direto.

X''_q - reatância subtransitória de eixo quadratura.

R_g - resistência do gerador a 60 Hz.

h - ordem harmônico.

O fator $h^{0.96}$ incorporado no cálculo da resistência representa o efeito pelicular [03] e [02].

2.3.1.6 - Capacitores

A presença de capacitores em sistemas de potência é uma constante, sendo que eles sempre desempenham o papel de compensadores de potência reativa. Os capacitores podem ser inseridos entre um ponto do sistema e a terra, no caso de compensação paralela, ou em série numa linha, no caso de compensação série.

Em ambos os casos, para estudos de penetração harmônica, o capacitor normalmente é representado simplesmente por sua capacitância equivalente, sendo seu modelo convenientemente inserido no sistema, como ilustrado na figura 2.10.

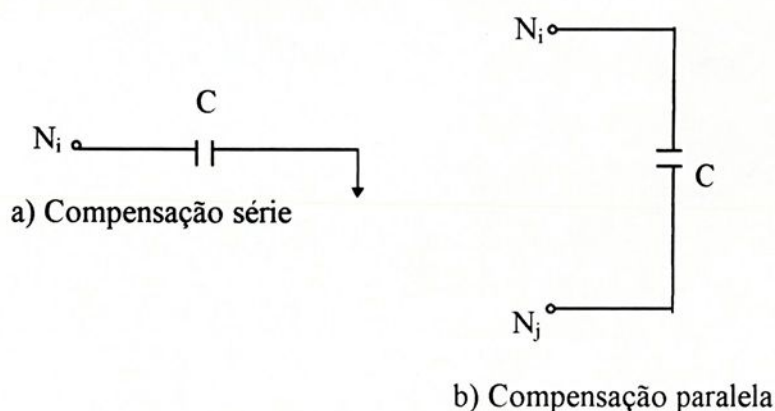


Figura 2.10 - Modelo de capacitores.

2.3.1.7 - Reatores

Os reatores de potência são de dois tipos: aqueles com núcleo em material magnético, que são semelhantes à transformadores com secundário em aberto, e aqueles com núcleo de ar, que se assemelham mais à transformadores em curto-circuito, exceto pelo fato de apresentarem uma capacitância consideravelmente menor.

Os reatores de núcleo em material magnético são usualmente ligados como componentes em paralelo, enquanto que os com núcleo de ar são conectados como elementos série para limitação de corrente de falta. Normalmente, nos dois casos, o reator pode ser representado por um ramo RL série conforme a Figura 2.11, [01].

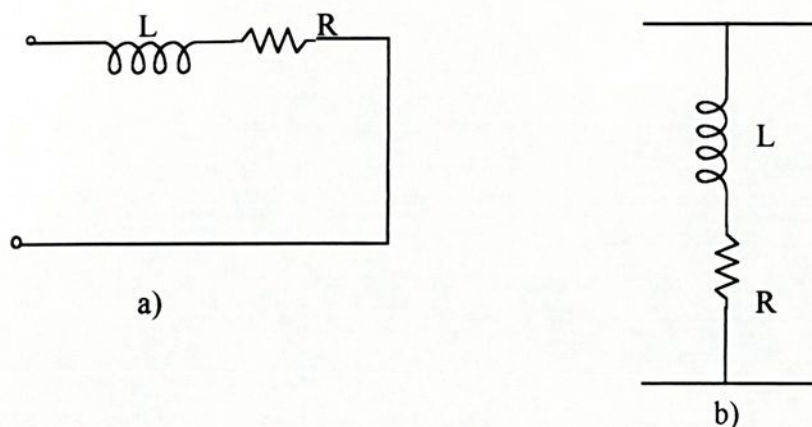


Figura 2.11 - Modelo de reatores

a) Componente série

b) Componente paralelo

2.4 - EXEMPLO DE FLUXO HARMÔNICO.

O programa de cálculo digital de fluxo harmônico utilizado é o HARMOD. Optou-se pela utilização deste software como ferramenta de apoio neste trabalho por se tratar de um programa comercial bastante difundido no setor elétrico brasileiro.

O HARMOD utiliza uma formulação monofásica, sendo portanto mais adequado para análise de sistemas equilibrados e apresenta como resultados os níveis de tensão e corrente harmônicas bem como os fatores de distorção nas diferentes barras do sistema elétrico. Trata-se de uma versão adaptada do programa HARP-03 desenvolvido na Inglaterra e a principal característica que o diferencia do seu antecessor é que o HARMOD já incorpora modelos matemáticos para a simulação digital de diferentes fontes harmônicas.

Apresenta-se a seguir a título de exemplo os resultados para o fluxo harmônico em um sistema industrial ilustrado na figura 2.12

2.4.1 - Dados do sistema elétrico simulado

Os dados das componentes do sistema aparecem nas tabelas 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 obtidos a partir da referência [4].

A principal fonte harmônica considerada no exemplo foi um conversor estático conectado ao barramento 7 que alimenta uma máquina de corrente contínua. Os dados deste conversor são mostrados na figura 2.13.

Foi assumido todos os motores trabalhando em regime contínuo.

Tabela 2.2 - Dados dos transformadores

Transformador	Potência nom. (MVA)	Tensão (kV)	Impedância %
TP	20,00	69/12,47	9,71
T3	7,50	12,47/2,4	5,5
T4	2,50	12,47/2,4	5,05
T5	2,50	12,47/2,4	5,0
T6	5,00	12,47/2,4	5,16
T7	3,75	12,47/2,4	5,5
T8	3,75	12,47/2,4	5,5

Tabela 2.3 - Dados dos capacitores

BARRA	kVAR
2	4800
3	575
4	450
5	150
6	175
7	500
8	550

Tabela 2.4 - Dados dos motores de indução

BARRA	Pot.nom. (kW)	Tensão nom. (kV)	Fator de potência	Pot. perdas (MW)	Reat. rotor bloq. (p.u.)
3	3,4	2,4	0,88	0,046	2,000
4	3,0	2,4	0,88	0,072	1,390
5	0,8	2,4	0,88	0,022	3,513
6	4,0	2,4	0,88	0,063	1,539
7	2,3	2,4	0,88	0,046	2,000
8	2,1	2,4	0,88	0,072	1,390
9	0,9	2,4	0,88	0,072	1,390

Tabela 2.5 - Dados do sistema

S_{CC} (MVA)	2000
Tensão nominal	69 kV
X''_d (p.u.)	1,62
X''_q (p.u.)	2,43
X'_d (p.u.)	1,95

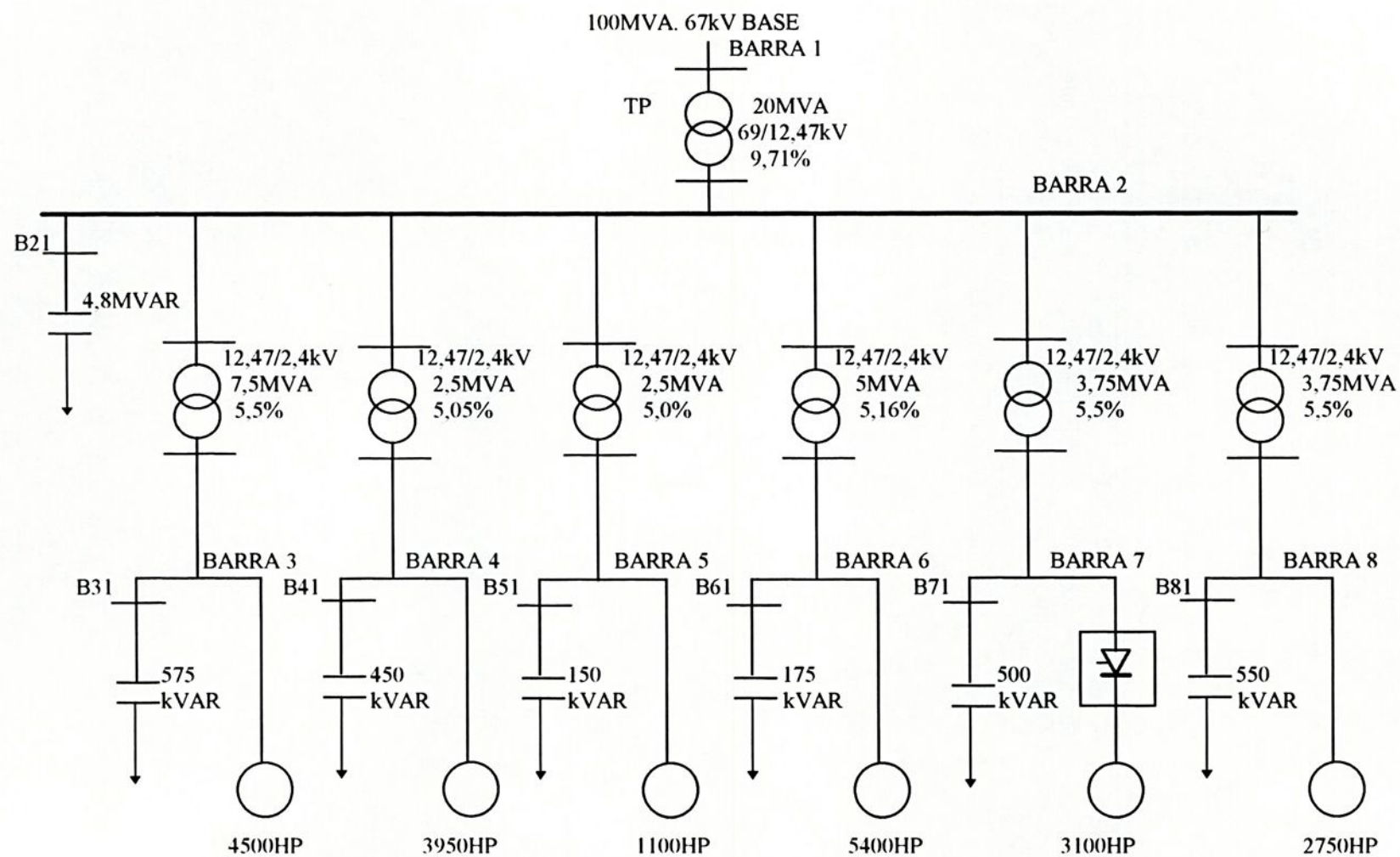


Figura 2.12 - Diagrama unifilar do sistema.

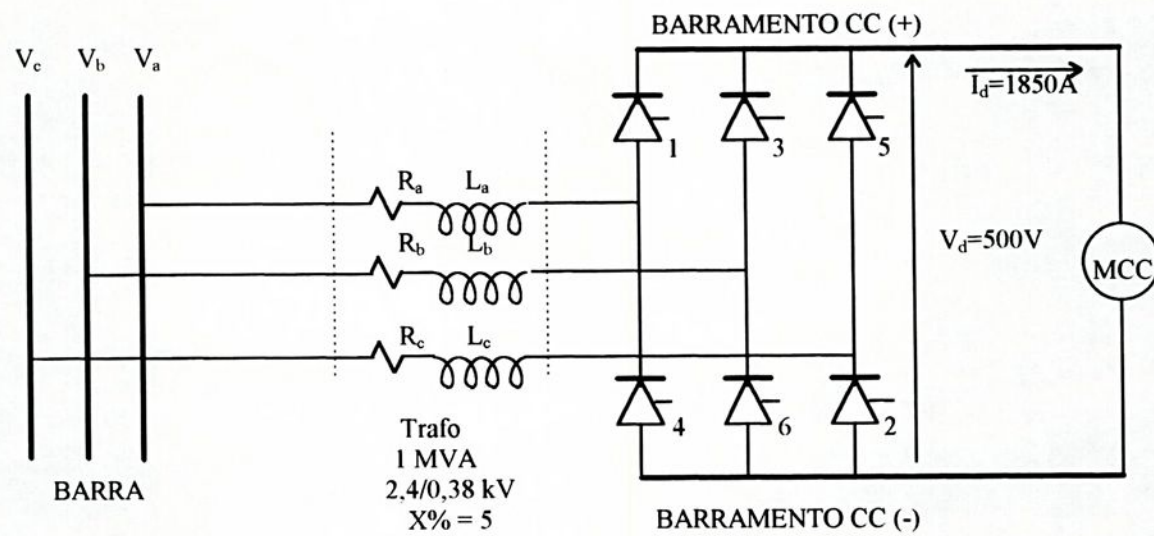


Figura 2.13 - Conversor estático

2.4.2 - Procedimento utilizado

Com os dados anteriores do sistema e utilizando-se os modelos apresentados neste capítulo foi montado um banco de dados e a seguir processado o fluxo harmônico.

2.4.2.1 - Resultados obtidos

HARMÔNICO INICIAL	2,00000
HARMÔNICO FINAL	15,00000
INTERVALO HARMÔNICO	1,00000
INTERVALO PARA SAÍDA GRÁFICA ..	60,00000 Hz
FREQUÊNCIA NOMINAL DO SISTEMA ..	60,00000 Hz
POTÊNCIA BASE	100,00000 MVA

DADOS DE LINHA					
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	RR (pu)	REAT. IND. (pu)	SUSCEP. CAP (pu)	CÓDIGO LINHA
BAR2	BAR21	,00010	,00001	,00000	
BAR3	BAR31	,00010	,00001	,00000	
BAR4	BAR41	,00010	,00001	,00000	
BAR5	BAR51	,00010	,00001	,00000	
BAR6	BAR61	,00010	,00001	,00000	
BAR7	BAR71	,00010	,00001	,00000	
BAR8	BAR81	,00010	,00001	,00000	

***** TRANSFORMADORES *****								
BARRA EMISS.	BARRA RECEP.	MODEL	Rs (pu)	Rp (pu)	Xt (pu)	Bc (pu)	Kt	
BAR1	BAR2	4	,00000	38,84000	,48550	,00000	5,53000	
BAR2	BAR3	4	,00000	58,66000	,73333	,00000	5,19600	
BAR2	BAR4	4	,00000	161,60000	2,02000	,00000	5,19600	
BAR2	BAR5	4	,00000	160,00000	2,00000	,00000	5,19600	
BAR2	BAR6	4	,00000	82,56000	1,03200	,00000	5,19600	
BAR2	BAR7	4	,00000	117,33000	1,46666	,00000	5,19600	
BAR2	BAR8	4	,00000	117,33000	1,46666	,00000	5,19600	

* OS VALORES EM PU ESTÃO REFERIDOS A BASE DE 100 MVA

BANCOS DE CAPACITORES	
BARRA	SUSCEPT. (pu)
BAR21	1,38800
BAR31	4,48400
BAR41	3,50700
BAR51	1,16900
BAR61	1,36300
BAR71	3,89600
BAR81	4,28600

*** GERADORES ***								
BARRA	MODELO	Sec (MVA)	TENS. NOM. (kV)	Xd" (pu)	Xq" (pu)	Xd' (pu)	Cf (pu)	TENS. BASE (kV)
BAR1	1	2000,00000	69,00000	1,62000	2,43000	1,95000	1,00000	67,00000

***** CARGAS *****							
***** CARGA - MOTORES DE INDUÇÃO *****							
BARRA	MODELO	POT. PERDAS MI (MW)	REAT. ROTOR BLOQU. (pu)	CORRENTE NOMINAL (kA)	TENSÃO NOMINAL (kV)	TENSÃO BASE (kV)	
BAR3	3	,04600	2,00000	,92000	2,40000	67,00000	
BAR4	3	,07200	1,39000	,81000	2,40000	67,00000	
BAR5	3	,02200	3,51300	,22400	2,40000	67,00000	
BAR6	3	,06300	1,53900	,11000	2,40000	67,00000	
BAR7	3	,04600	2,00000	,63000	2,40000	67,00000	
BAR8	3	,07200	1,39000	,56000	2,40000	67,00000	

***** C A R G A S E S P E C I A I S *****

***** C O N V E R S O R E S *****

BARRA	TENSÃO PRIMÁRIA (kV)	TENSÃO SECUND. (kV)	POT. TRAFO (MVA)	REATÂNCIA A.C (%)	OHMS	ÂNGULO DEFAS. (GRAUS)	CORRENTE LADO D.C (AMP.)	ÂNGULO DISPARO (GRAUS)	ÂNGULO COMUT. (GRAUS)
BAR7	2,40	,38	1,00	5,000	,01	7,500	1850,00	30,00	5,28

* TENSÃO BASE NO BARRAMENTO = 67,00 kV

* VALORES EM OHMS ESTÃO REFERIDOS AO LADO SECUNDÁRIO.

* VALORES %(S) NA BASE DO TRANSFORMADOR.

***** CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS *****
***** E *****
***** TENSÕES HARMÔNICAS APLICADAS *****

INJEÇÃO DE CORRENTES DEVIDO A CONVERSORES

CORRENTES INJETADAS NA BARRA BAR7		
HARMÔNICO	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)
1	,26494	327,29540
5	,05254	61,47595
7	,03721	356,06480
11	,02308	90,23822
13	,01919	24,82143

***** R E S U L T A D O S *****

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 5,0		
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)
BAR1	,00006	151,77340
BAR2	,00001	151,77340
BAR3	,00000	332,04860
BAR4	,00000	332,01860
BAR5	,00000	331,95320
BAR6	,00000	331,96110
BAR7	,00271	331,58950
BAR8	,00000	332,04130
BAR21	,00001	151,73370
BAR31	,00000	331,92000
BAR41	,00000	331,91810
BAR51	,00000	331,91980
BAR61	,00000	331,92200
BAR71	,00272	331,47780
BAR81	,00000	331,91840

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 5,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ÂNGULO (GRAUS)
BAR1	BAR2	,00000	,14324
BAR2	BAR3	,00000	61,92003
BAR2	BAR4	,00000	61,91806
BAR2	BAR5	,00000	61,91975
BAR2	BAR6	,00000	61,92201
BAR2	BAR7	,00007	61,73285
BAR2	BAR8	,00000	61,91837
BAR2	BAR21	,00007	241,72890
BAR3	BAR31	,00000	61,91971
BAR4	BAR41	,00000	61,91933
BAR5	BAR51	,00000	61,92005
BAR6	BAR61	,00000	61,92182
BAR7	BAR71	,05291	61,47712
BAR8	BAR81	,00000	61,91751
BAR21		,00007	241,73370
BAR31		,00000	61,92003



CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 5,0			
BARRA	BARRA	CORRENTE	ANGULO
EMISSORA	RECEPT	(PU)	(GRAUS)
BAR41		,00000	61,91806
BAR51		,00000	61,91975
BAR61		,00000	61,92200
BAR71		,05291	61,47775
BAR81		,00000	61,91839

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 7,0		
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)
BAR1	,00001	86,38074
BAR2	,00000	86,38068
BAR3	,00000	266,66500
BAR4	,00000	266,62460
BAR5	,00000	266,53130
BAR6	,00000	266,54010
BAR7	,00137	266,22230
BAR8	,00000	266,65620
BAR21	,00000	86,32501
BAR31	,00000	266,48480
BAR41	,00000	266,48370
BAR51	,00000	266,48440
BAR61	,00000	266,48540
BAR71	,00137	266,06570
BAR81	,00000	266,48390

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 7,0			
BARRA	BARRA	CORRENTE	ANGULO
EMISSORA	RECEPT	(PU)	(GRAUS)
BAR1	BAR2	,00000	,00000
BAR2	BAR3	,00000	356,48470
BAR2	BAR4	,00000	356,48370
BAR2	BAR5	,00000	356,48430
BAR2	BAR6	,00000	356,48540
BAR2	BAR7	,00003	356,32460
BAR2	BAR8	,00000	356,48390

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 7,0			
BARRA	BARRA	CORRENTE	ANGULO
EMISSORA	RECEPT	(PU)	(GRAUS)
BAR2	BAR21	,00003	176,32370
BAR3	BAR31	,00000	356,48500
BAR4	BAR41	,00000	356,48360
BAR5	BAR51	,00000	356,48570
BAR6	BAR61	,00000	356,48210
BAR7	BAR71	,03734	356,06640
BAR8	BAR81	,00000	356,48360
BAR21		,00003	176,32500
BAR31		,00000	356,48480
BAR41		,00000	356,48370
BAR51		,00000	356,48430
BAR61		,00000	356,48540
BAR71		,03734	356,06570
BAR81		,00000	356,48400

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 11,0		
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)
BAR1	,00000	180,63800
BAR2	,00000	180,63830
BAR3	,00000	,98822
BAR4	,00000	,92549
BAR5	,00000	,77746
BAR6	,00000	,79013
BAR7	,00054	,48519
BAR8	,00000	,97517
BAR21	,00000	180,55040
BAR31	,00000	,70407
BAR41	,00000	,70352
BAR51	,00000	,70368
BAR61	,00000	,70408
BAR71	,00054	,23848
BAR81	,00000	,70363

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 11,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
BAR1	BAR2	,00000	90,51244
BAR2	BAR3	,00000	90,70388
BAR2	BAR4	,00000	90,70333
BAR2	BAR5	,00000	90,70361
BAR2	BAR6	,00000	90,70416
BAR2	BAR7	,00001	90,55036
BAR2	BAR8	,00000	90,70388
BAR2	BAR21	,00001	270,55150
BAR3	BAR31	,00000	90,70388
BAR4	BAR41	,00000	90,70361
BAR5	BAR51	,00000	90,70388
BAR6	BAR61	,00000	90,70361
BAR7	BAR71	,02311	90,23904
BAR8	BAR81	,00000	90,70361
BAR21		,00001	270,55050
BAR31		,00000	90,70444
BAR41		,00000	90,70333
BAR51		,00000	90,70361
BAR61		,00000	90,70416
BAR71		,02311	90,23904
BAR81		,00000	90,70361

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 13,0		
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)
BAR1	,00000	115,27270
BAR2	,00000	115,27280
BAR3	,00000	295,66510
BAR4	,00000	295,59090
BAR5	,00000	295,41540
BAR6	,00000	295,43030
BAR7	,00038	295,11390
BAR8	,00000	295,64970
BAR21	,00000	115,16910
BAR31	,00000	295,32860
BAR41	,00000	295,32810
BAR51	,00000	295,32820
BAR61	,00000	295,32850

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 13,0		
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)
BAR71	,00038	294,82180
BAR81	,00000	295,32820

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 13,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
BAR1	BAR2	,00000	,00000
BAR2	BAR3	,00000	25,32854
BAR2	BAR4	,00000	25,32810
BAR2	BAR5	,00000	25,32820
BAR2	BAR6	,00000	25,32850
BAR2	BAR7	,00000	25,16901
BAR2	BAR8	,00000	25,32819
BAR2	BAR21	,00000	205,16910
BAR3	BAR31	,00000	25,32860
BAR4	BAR41	,00000	25,32813
BAR5	BAR51	,00000	25,32785
BAR6	BAR61	,00000	25,32790
BAR7	BAR71	,01921	24,82189
BAR8	BAR81	,00000	25,32836
BAR21		,00000	205,16910
BAR31		,00000	25,32854
BAR41		,00000	25,32810
BAR51		,00000	25,32819
BAR61		,00000	25,32850
BAR71		,01921	24,82179
BAR81		,00000	25,32819



***** TABELAS DE DISTORÇÕES DE CORRENTE E TENSÃO *****

DISTORÇÃO DE TENSÃO		
BARRA	DISTORÇÃO (%)	
BAR1		,00589
BAR2		,00107
BAR3		,00000
BAR4		,00000
BAR5		,00000
BAR6		,00001
BAR7		,31082
BAR8		,00000
BAR21		,00107
BAR31		,00000
BAR41		,00000
BAR51		,00000
BAR61		,00001
BAR71		,31124
BAR81		,00000

** DISTORÇÃO DE CORRENTE **		
BARRA EMISS.	BARRA RECEPT	DISTORÇÃO (%)
BAR1	BAR2	,00000
BAR2	BAR3	,00001
BAR2	BAR4	,00000
BAR2	BAR5	,00000
BAR2	BAR6	,00001
BAR2	BAR7	,00761
BAR2	BAR8	,00001
BAR2	BAR21	,00764
BAR3	BAR31	,00006
BAR4	BAR41	,00002
BAR5	BAR51	,00002
BAR6	BAR61	,00004

** DISTORÇÃO DE CORRENTE **		
BARRA EMISS.	BARRA RECEPT	DISTORÇÃO (%)
BAR7	BAR71	7,13947
BAR8	BAR81	,00003
BAR21		,00764
BAR31		,00006
BAR41		,00002
BAR51		,00002
BAR61		,00004
BAR71		7,13951
BAR81		,00003

3.1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia elétrica possuem em geral uma natureza indutiva decorrentes principalmente da presença de transformadores e motores elétricos. Dependendo da forma de utilização destes equipamentos e do ciclo de carga, o sistema elétrico pode apresentar um fator de potência incompatível com a regulamentação vigente. Neste sentido muitas vezes torna-se necessário a instalação de bancos de capacitores para compensação do fator de potência e regulação de tensão.

Os bancos de capacitores destinados a correção do fator de potência e melhoria da tensão são elementos bastantes sensíveis aos efeitos decorrentes de uma alimentação distorcida.

Quando analisados individualmente verifica-se que sendo a reatância capacitiva inversamente proporcional a frequência, a impedância total do banco de capacitores reduz-se frente as harmônicas e uma corrente excessiva poderá fluir entre as unidades que compõe o banco.

Por outro lado, sob o ponto de vista global, os bancos de capacitores podem formar em conjunto com os demais componentes dos sistemas elétricos ressonâncias série e/ou paralelas que podem resultar em altas correntes de circulação e/ou sobretensões harmônicas.

Estas ocorrências podem comprometer drasticamente a operação dos bancos de capacitores devido principalmente a queima excessiva de fusíveis, operação inadequada da proteção, vibração audível e degradação da vida útil do equipamento.

3.2 - PERDAS

As perdas em capacitores são em geral pequenas e existe pouca informação sobre como elas variam com a frequência. Entretanto, considerando a perda total dividida em três parcelas distintas é possível identificar algumas peculiaridades do seu comportamento. Admitindo-se a primeira parcela como sendo as perdas no resistor de descarga sabe-se que esta independe da frequência e é menor do que 0,5 watt/ kVAR [15]. A segunda parcela, ou



seja, as perdas do dielétrico é de cerca de 1,0 watt/ kVAR a 60 Hz e aumenta com o aumento da frequência para uma dada tensão nos terminais. Sabendo-se que a reatância do capacitor diminui com o aumento da frequência a tensão sobre o mesmo, para uma dada corrente, também diminui. Desta forma o efeito líquido é que para uma dada corrente, as perdas no dielétrico diminuem proporcionalmente ao aumento da frequência. Lembrando que esta componente de perdas do capacitor é proporcional a sua potência nominal na frequência em questão, ou seja, à E^2/X_c ou $E^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$ em termos de tensão, e $I^2 \cdot X_c$ ou $I^2 / 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$ em termos de corrente, então é permitido aos padrões de capacitores especificar mais fluxo de corrente nas frequências harmônicas, do que na fundamental.

A terceira componente de perdas é a perda $I^2 \cdot R$ nos condutores, junções e filme condutor do capacitor. Estas são da ordem de 0,7 watts/kVAR a 60 Hz, não se tendo informações das características destas perdas com a frequência. Entretanto, devido à geometria envolvida, o efeito da proximidade pode ser apreciável.

O aumento total nas perdas de um capacitor devido a distorção de onda é pequeno em termos dos kVA do sistema, porém, com respeito a potência nominal dos capacitores, estas perdas por KVAR podem resultar num substancial aumento na temperatura do capacitor e uma redução na sua vida útil

De um modo geral, recomenda-se a utilização da expressão 3.1 para se obter uma estimativa do valor das perdas em capacitores sujeitos a alimentação distorcida [15] e [09].

$$P = \sum_{n=1}^{n=\infty} C \cdot \tan(\delta) \cdot n \cdot \omega \cdot V_n^2 \quad (3.1)$$

Onde:

- C - capacitância
- $\tan(\delta)$ - fator de perdas
- ω - frequência angular
- n - ordem harmônica
- V_n - valor eficaz da n-ésima harmônica da tensão

Com relação á solicitação do isolamento sabe-se que este efeito está diretamente ligado aos valores de pico da tensão de alimentação. Os valores de pico a que fica sujeito o capacitor dependem naturalmente da forma de onda da tensão de alimentação e esta por sua vez depende



das amplitudes e dos ângulos de fases dos diferentes componentes harmônicos. Os altos valores de pico podem aumentar significativamente o fenômeno de corona e descargas parciais, provocando um aumento da temperatura média de operação. Em alguns casos a vaporização do material isolante pode levar a unidade a explosão. [11], [02].

Tipicamente, a um aumento de 10% no valor de pico da tensão, resulta em 7% de aumento na temperatura de operação e reduz a vida útil em cerca de 30%, [02].

3.3 - NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Considerando as características operacionais dos bancos de capacitores sujeitos a uma alimentação distorcida como descrito, a norma ANSI / IEEE 18-1980 estabelece limites a serem atendidos no sentido de preservar a integridade dos bancos de capacitores.

Neste sentido admite-se que os capacitores devem operar abaixo de 135% da sua potência reativa nominal para que possa ter um desempenho satisfatório em regime contínuo.

$$Q_{\max} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} (I_n^2 / n) \leq 1,35 \quad (3.2)$$

Esta reserva de potência deve contemplar :

- o aumento da potência reativa devido às harmônicas;
- o aumento da potência reativa devido a um aumento da tensão na frequência fundamental acima dos valores nominais;
- o aumento da potência reativa devido ao aumento do valor da capacitância dentro da tolerância especificada pelo fabricante (as normas estabelecem que o valor da capacitância deve respeitar limites de tolerância entre 0% e 15%, sendo 10% um valor típico).

A norma define como aceitável um limite de 1,1 pu para a tensão de operação (3.3) e 1,8 pu para a corrente (3.4), sendo ambos para regime contínuo e incluindo todas as harmônicas.

$$V_{\text{eficaz}} = \left(\sum_{n=1}^{n_{\max}} V_n^2 \right)^{1/2} \leq 1,1 \quad (3.3)$$



$$I_{\text{eficaz}} = \left(\sum_{n=1}^{n_{\text{max}}} I_n^2 \right)^{1/2} \leq 1,8 \quad (3.4)$$

O nível de tensão definido na expressão (3.3) não considera os efeitos associados ao fenômeno de corona e descargas parciais que dependem dos valores de pico e podem ter uma influência significativa sobre a vida útil dos capacitores. Desta forma, a norma recomenda também que o valor de pico máximo tolerável em regime contínuo de operação, incluindo todas as harmônicas, não deve exceder a 1,2 pu do valor de pico da tensão nominal de operação.

$$V_{\text{pico}} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{n_{\text{max}}} (V_n) \leq 1,2 \quad (3.5)$$

3.4 - RESSONÂNCIAS

Como se sabe, a reatância capacitiva é inversamente proporcional a frequência e desta forma a impedância total do banco de capacitores reduz-se frente as harmônicas. Por outro lados os elementos indutivos apresentam uma impedância diretamente proporcional a frequência. Desta forma a combinação entre os elementos indutivos e capacitivos do sistema pode levar ao aparecimento de ressonâncias série ou paralela.

3.4.1 - Ressonância série

Considerando-se o circuito equivalente ilustrado na figura 3.1a, e sabendo-se que na frequência de ressonância a reatância indutiva se iguala a reatância capacitiva, a ordem harmônica ressonante pode ser obtida pela expressão 3.6. Na frequência de ressonância série a impedância total resultante é baixa sendo dada apenas pela componente resistiva, como ilustra a figura 3.1b.

$$n = \frac{1}{2\pi f \sqrt{L.C}} \quad (3.6)$$



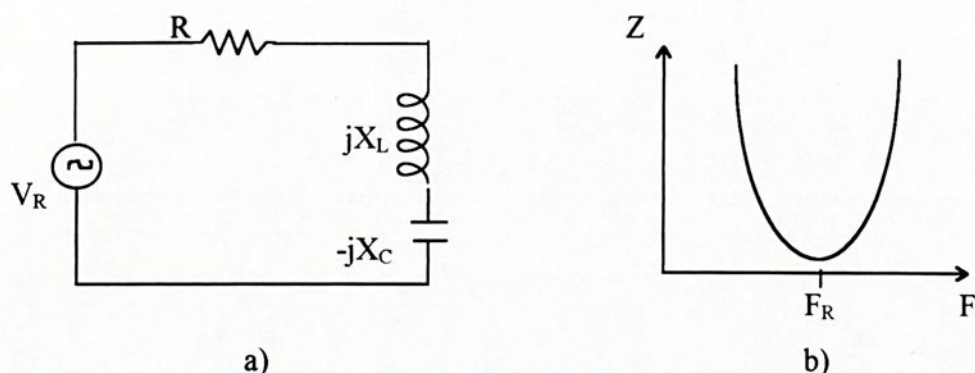


Figura 3.1 - Ressonância série

Diante de uma ressonância série o problema do fluxo excessivo de corrente harmônica sobre os capacitores pode ser substancialmente agravado devido a baixa impedância apresentada pelo circuito LC. Como decorrência observa-se uma queima freqüente dos fusíveis em algumas unidades que compõe o banco e um aquecimento generalizado do equipamento. Nestes casos pode-se ter uma total indisponibilidade do banco de capacitores devido atuação da proteção ou no mínimo um comprometimento da sua vida útil resultante do aumento da temperatura de operação.

3.4.2 - Ressonância paralela

A ressonância paralela é similar à ressonância série no aspecto que a reatância indutiva se iguala à reatância capacitiva, todavia, a impedância paralela resultante é significativamente diferente. A figura 3.2b apresenta o módulo da impedância em função da freqüência para o circuito paralelo ilustrado na figura 3.2a. Na freqüência de ressonância a impedância é muito alta e se uma fonte desta freqüência estiver conectada ao circuito, uma alta corrente de circulação passará a existir entre o capacitor e o indutor mesmo que a corrente injetada pela fonte seja pequena.

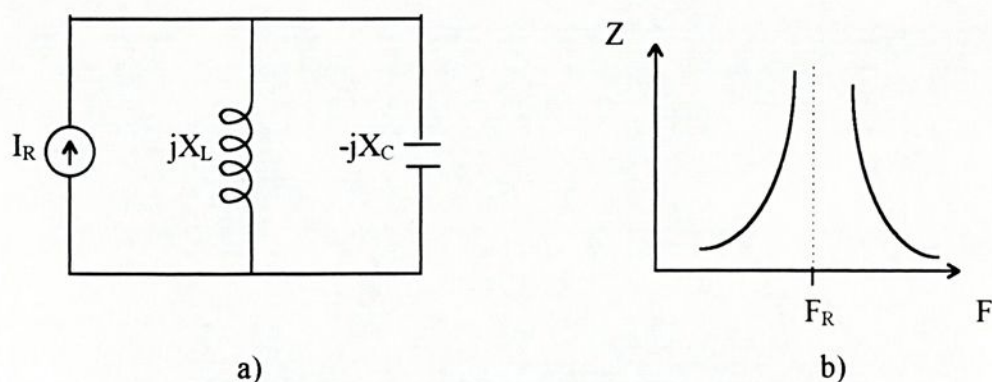


Figura 3.2 - Ressonância paralela

As ressonâncias paralelas também podem levar a um aumento significativo da distorção da tensão aplicada aos bancos de capacitores. A corrente harmônica na frequência de ressonância pode produzir uma tensão harmônica bastante elevada que dependendo da sua composição com a tensão fundamental pode produzir uma forma de onda resultante total com elevados valores de pico. Este fato, como descrito anteriormente, compromete significativamente a operação do banco de capacitores diminuindo drasticamente sua vida útil e em alguns casos pode até levar algumas unidades a destruição por explosão.

3.4.3 - As ressonâncias nos sistemas de potência

Nos sistemas de potência, a utilização de capacitores para a correção do fator de potência pode apresentar a ocorrência dos dois tipos de ressonância ou uma combinação de ambos, que normalmente resulta em sobrecorrentes e/ou sobretensões se os pontos de ressonância forem muito próximos das frequências geradas pelas fontes harmônicas.

Nos sistemas elétricos industriais que utilizam conversores estáticos para acionamentos de máquinas elétricas existe uma alta probabilidade de ocorrência de ressonância nas frequências harmônicas características mais baixas.

Admitindo o sistema industrial simplificado ilustrado na figura 3.3, a partir da expressão 3.6 é possível concluir que a ordem harmônica ressonante será dada pela expressão 3.7.

$$n = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi f)^2 LC}} = \sqrt{\frac{1}{X_L \frac{1}{X_C}}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

ou ainda:

$$\frac{V^2}{V^2} * \frac{X_C}{X_L} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_C}}$$



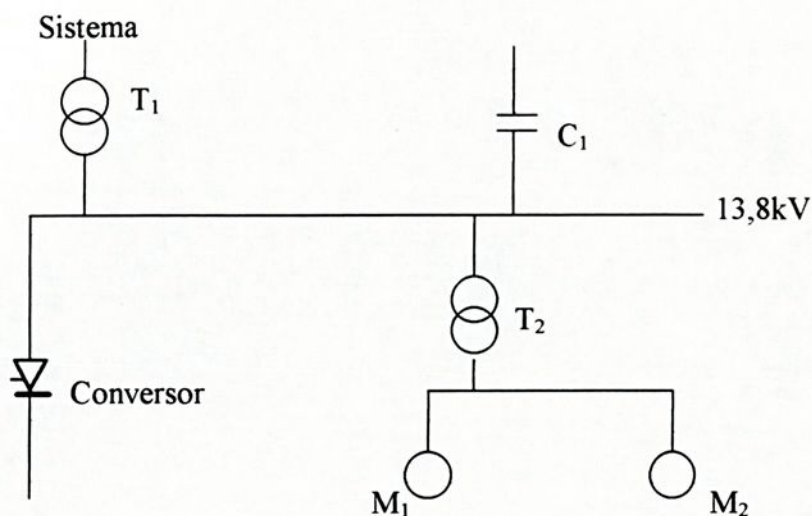


Figura 3.3 - Diagrama elétrico simplificado de um sistema industrial

$$n = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (3.7)$$

onde:

S_{cc} - nível de curto-circuito na barra do capacitor;

Q_c - potência nominal do banco de capacitores.

Nestas condições, se o sistema ilustrado opera com um fator de potência de 0,8 e requer uma compensação para 0,95 o fator de multiplicação para compensação pode ser obtido a partir da expressão 3.8 .

$$Q_c = [\tan(\phi_a) - \tan(\phi_d)] \cdot P \quad (3.8)$$

onde:

ϕ_a - ângulo do fator de potência atual

ϕ_d - ângulo do fator de potência desejado

P - potência ativa demandada.

tem-se;

$$Q_c = 0,421 \cdot P \quad (3.9)$$

Assumindo, a título de exemplo, uma carga de 36 MW alimentada por um sistema elétrico com nível de curto-circuito de 500MVA, serão necessários 15 MVar para

compensação do fator de potência de 0,8 para 0,95. Neste caso a frequência de ressonância resultante fica entre 300 Hz e 420 Hz, ou seja, 5 e 7 harmônicas. Neste caso, a impedância total sendo excitada pelas correntes harmônicas características geradas pelo conversor, gera tensões harmônicas elevadas que podem resultar em elevados valores de pico na tensão de alimentação do banco de capacitores. A tabela 3.1 ilustra alguns valores de frequência de ressonância para diferentes valores do nível de curto-circuito e potência nominal dos bancos de capacitores.

Tabela 3.1 - Características de Ressonância do Sistema

Scc (MVA)	Qr (MVAr)	Fr	N
1000	20,4	420	7
500	10,2	420	7
250	5.1	420	7
1000	30	346	5,77
500	15	346	5,77
250	7.5	346	5,77
1000	40	300	5
500	20	300	5
250	10	300	5

A corrente total circulante pode ser determinada a partir das expressões (3.10) e (3.11).

$$I_s^n = I_i^n \cdot \frac{Z_c(n)}{Z_s(n) + Z_c(n)} \tag{3.10}$$

$$I_c^n = I_i^n \cdot \frac{Z_s(n)}{Z_s(n) + Z_c(n)} \tag{3.11}$$

onde:

- I_c^n - corrente harmônica de ordem n pelo capacitor
- I_i^n - corrente harmônica de ordem n injetada pela fonte
- I_s^n - corrente harmônica de ordem n pelo sistema
- $Z_s(n)$ - impedância do sistema para a ordem harmônica n
- $Z_c(n)$ - impedância do banco de capacitores para a ordem harmônica n.

3.5 - PROTEÇÃO

O sistema de proteção convencional baseado em relés estáticos normalmente adotado nas instalações de grandes bancos de capacitores pode apresentar uma operação inadequada em sistemas sujeitos a distorções harmônicas. Estes tipos de relés são projetados para responderem aos valores de pico da tensão aplicada e desta forma, sob alimentação não senoidal, estes podem não corresponderem aos verdadeiros valores suportados pelos capacitores.

Em todos os casos uma curva característica de tempo inverso é utilizada para determinar o tempo de "trip" quando o limiar de tensão máxima permissível é atingido. A questão que naturalmente surge quando se utiliza este procedimento é como relacionar os valores eficazes e os valores de pico quando as formas de onda são distorcidas, uma vez os limites operacionais dos bancos de capacitores envolvem ambos.

O ajuste do relé é baseado no valor eficaz admissível de acordo com uma curva de tempo inverso ilustrada na figura 3.4. Convencionalmente os relés estáticos detectam o valor de pico instantâneo correspondente ao valor eficaz ajustado, conforme ilustrado pela linha 2 na figura 3.5. Contudo, esta relação é válida somente para uma forma de onda senoidal pura. No caso de uma forma de onda de tensão distorcida o valor de pico normalmente não corresponde a $\sqrt{2}$ vezes o valor eficaz da tensão. Desta forma para o valor previamente ajustado pode ocorrer uma operação indesejada da proteção.

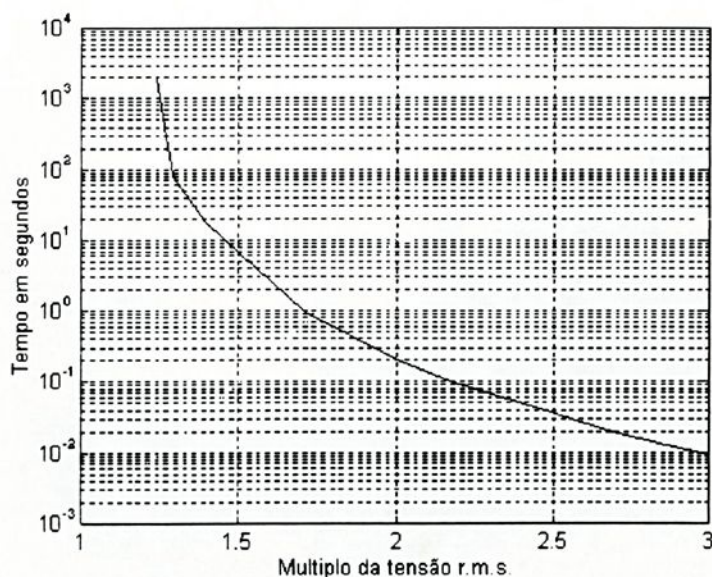


Figura 3.4 - Curva de tempo inverso-tensão

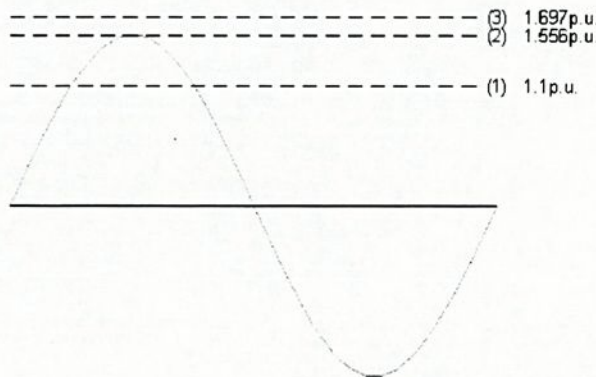


Figura 3.5 - Ajuste do relé de sobretensão

Com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos bancos de capacitores a serem utilizados em sistemas elétricos poluídos é apresentada a seguir a metodologia proposta na referência [06], utilizando-se de artifícios a serem implementados no próprio sistema de proteção.

3.5.1 - Índice de distorção

Considerando uma forma de onda de tensão com uma tensão eficaz em p.u., $V_{\text{eficaz}}^{\text{real}}$, e um valor pico, $V_{\text{pico}}^{\text{real}}$, define-se como valor eficaz equivalente, $V_{\text{eficaz}}^{\text{eq}}$, a relação dada na expressão (3.12) e como valor de pico equivalente, $V_{\text{pico}}^{\text{eq}}$, a relação estabelecida em (3.13).

$$V_{\text{eficaz}}^{\text{eq}} = \frac{V_{\text{pico}}^{\text{real}}}{\sqrt{2}} \quad (3.12)$$

$$V_{\text{pico}}^{\text{eq}} = V_{\text{eficaz}}^{\text{real}} \cdot \sqrt{2} \quad (3.13)$$

O índice de distorção de uma onda é então definido como a relação entre a tensão pico verdadeira e $\sqrt{2}$ vezes a tensão eficaz verdadeira:

$$ID = \frac{V_{\text{pico}}^{\text{real}}}{\sqrt{2} \cdot V_{\text{eficaz}}^{\text{real}}} \quad (3.14)$$

ou ainda:

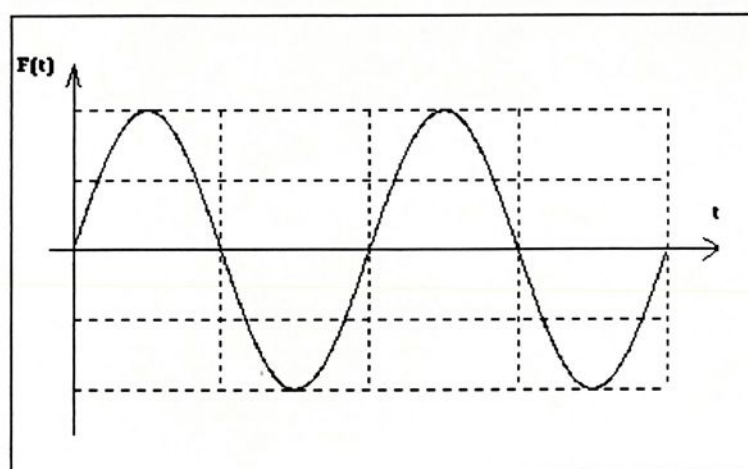
$$ID = \frac{V_{pico}^{real}}{V_{pico}^{eq}} = \frac{V_{efvaz}^{eq}}{V_{eficaz}^{real}} \quad (3.15)$$

Considerando o índice de distorção definido em (3.14) ou (3.15) é possível identificar três tipos básicos de formas de onda:

Tipo I é uma forma de onda puramente senoidal com $ID=1$, figura 3.6a.

Tipo II é uma forma de onda com $ID<1$, figura 3.6b.

Tipo III é uma forma de onda com $ID>1$, figura 3.6c.



$$Fd = 1,0$$

$$V_{pico}^{real} = 1,414$$

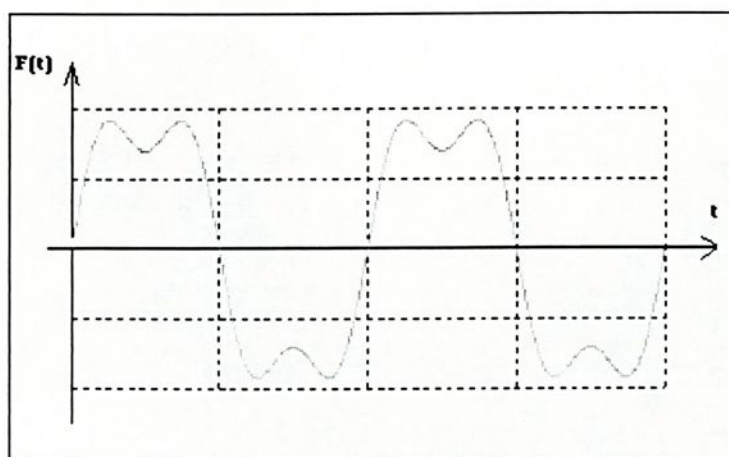
$$V_{pico}^{eq} = 1,414$$

$$V_{eficaz}^{real} = 1,00$$

$$V_{eficaz}^{eq} = 1,00$$

$$ID = 1,0$$

a) Forma de onda tipo I



$$Fd = 1,04$$

$$V_{pico}^{real} = 1,30$$

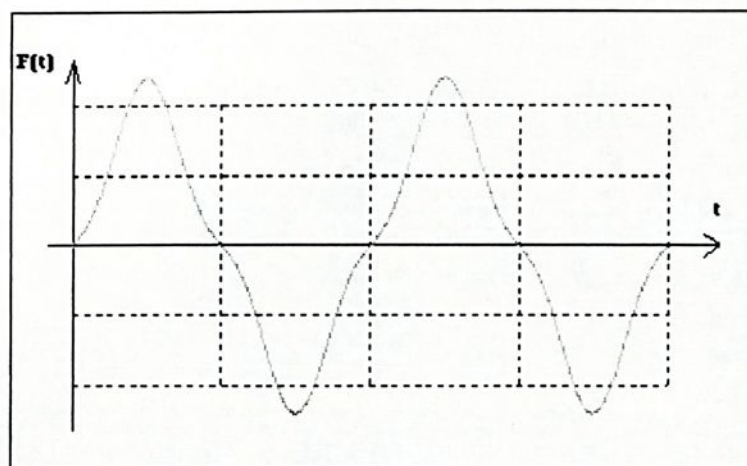
$$V_{pico}^{eq} = 1,48$$

$$V_{eficaz}^{real} = 1,04$$

$$V_{eficaz}^{eq} = 0,920$$

$$ID = 0,88$$

b) Forma de onda tipo II



$$F_d = 1,04$$

$$V_{\text{pico}}^{\text{real}} = 1,84$$

$$V_{\text{pico}}^{\text{eq}} = 1,30$$

$$V_{\text{eficaz}}^{\text{real}} = 1,04$$

$$V_{\text{eficaz}}^{\text{eq}} = 1,30$$

$$ID = 1,25$$

c) Forma de onda tipo III

Figura 3.6 - Formas de onda

A operação dos relés estáticos convencionais é baseada na medição do valor de pico da forma de onda e seguido do cálculo do valor eficaz que é obtido dividindo-se o valor de pico medido por $\sqrt{2}$. Esta operação levará a uma proteção desejada somente quando a forma de onda aplicada for do tipo I ($ID=1$), ou seja puramente senoidal. Naturalmente para qualquer outro caso tipo II ($ID < 1$) ou tipo III ($ID > 1$), ocorre uma falha na proteção, ou seja, a mesma não responde adequadamente aos valores previamente ajustados. Para formas de onda do tipo III haverá uma tendência a sobreproteção pois o valor eficaz a ser utilizado na curva de tempo inverso é ID vezes maior que o valor eficaz verdadeiro. Em contrapartida, para formas de onda do tipo II a tendência é de subproteção.

Observando ainda as formas de onda dos tipos II e III constata-se a ineficiência do controle apenas do fator de distorção; (F_d), como forma de prevenir problemas relacionados com as harmônicas. As formas de onda ilustradas nas figuras 3.6 a, b e c possuem o mesmo fator de distorção e no entanto podem ocasionar falhas de proteção com características distintas, ou seja, sobreproteção ou subproteção.

Naturalmente, a operação inadequada da proteção, seja de subproteção ou sobreproteção, deve ser evitada ou pelo menos minimizada pois enquanto a primeira pode levar o banco de capacitores a uma condição operativa com altas temperaturas a outra pode retirar o equipamento de serviço sem necessidade.

3.5.2 - Metodologia para minimização da operação inadequada da proteção

A referência [06] apresenta uma análise do comportamento da proteção de sobretensão com relés estáticos em bancos de capacitores instalados em sistemas elétricos em operação sujeitos a distorções harmônicas e conclui que é necessário medir não somente o valor de pico mas também o valor eficaz da tensão, para a determinação adequada do tempo de disparo do relé.

Baseado na medição destes dois valores alguns procedimentos podem ser implementados no sentido de tornar a proteção compatível com a forma de onda da tensão aplicada, considerando-se os limites impostos na norma ANSI / IEEE 18-1980.

Quando a tensão eficaz é maior do que 1,1 pu e o pico é menor que 1,697 vezes a tensão eficaz, o tempo de disparo do relé deve ser determinado através da curva característica de tempo inverso utilizando-se o valor eficaz verdadeiro, ou seja, o valor medido.

$$V^{\text{trip}} = V_{\text{eficaz}}^{\text{real}}$$

Por outro lado, se o valor de pico de tensão é maior que 1,697 vezes a tensão eficaz devem ser consideradas as seguintes aproximações:

Com $ID > 1$, mede-se o pico de tensão e utiliza-se a tensão eficaz equivalente para a determinação do tempo de disparo. Este critério é baseado no fato de que para as formas de onda do tipo III ($ID > 1$), se o banco de capacitores suporta o valor eficaz equivalente de uma senóide pura, poderá então suportar o valor pico da tensão efetivamente aplicada.

$$V^{\text{trip}} = V_{\text{eficaz}}^{\text{eq}}$$

Alternativamente, quando $ID < 1$, utiliza-se o valor eficaz da tensão medida. Para este caso, se o banco suporta o valor de pico equivalente da tensão, certamente suportará uma tensão cuja forma de onda apresente um valor de pico menor mas com o mesmo valor eficaz.

$$V^{\text{trip}} = V_{\text{eficaz}}^{\text{real}}$$



Esta metodologia certamente melhora o desempenho da proteção contudo trata-se ainda de um esquema conservativo, sobretudo porque a sobreproteção ainda existe para formas de onda com $ID > 1$, com um grau que depende basicamente do valor de ID .

Objetivando reduzir a atuação do relé na sobreproteção, sugere-se a introdução do fator de compensação para a determinação do valor eficaz a ser utilizado na curva de tempo inverso [06], segundo a expressão (3.16).

$$V^{trip} = 1,1 + \left[V_{eficaz}^{eq} - 1,1 \right] \frac{1}{ID^i} \tag{3.16}$$

O expoente i permite ajustar o grau de compensação desejado. Quanto maior o valor de i maior o grau de compensação obtido. Para $i=1$ não existe compensação. Um valor adequado para o grau de compensação poderá ser estabelecido pelos próprios fabricantes de capacitores [06].

A título de exemplo, apresenta-se na tabela 3.2 os resultados obtidos em testes realizados em um sistema real apresentado na referência [06]. O nível de “pick-up” foi ajustado para detectar valores de pico acima de 1,556 pu. Nestas condições, o relé convencional atuaria para o teste 1, uma vez que o valor eficaz equivalente determinado a partir do valor de pico medido é 1,144, apesar do valor eficaz verdadeiro ser de apenas 0,919 e portanto abaixo do valor permitido para operação contínua, 1,1pu. Nos teste 2 e 3 o limite para o valor de pico da tensão é excedido e nestas condições o tempo de operação será delimitado pela curva característica de tempo inverso, determinados a partir dos valores eficazes equivalentes, 1,309 e 1,423 respectivamente. Verifica-se também que para estes casos a atuação do relé também acontece a despeito do valor eficaz verdadeiro não ter excedido seu limite estabelecido pela norma.

TABELA 3.2 - Tensões nos capacitores

Teste	$V_{eficaz}^{real} (pu)$	$V_{pico}^{real} (pu)$	$V_{eficaz}^{eq} (pu)$	ID
1	0.919	1.618	1.144	1.244
2	0.961	1.851	1.309	1.362
3	0.990	2.013	1.423	1.437

Aplicando-se os princípios sugeridos para adequação da proteção, e considerando-se o valor $i=1$ para o grau de compensação, obtém-se uma atuação mais favorável da proteção no



sentido de atender os limites estabelecidos pela norma e sobretudo maximizar a disponibilidade do banco de capacitores no sistema elétrico. A tabela 3.3 ilustra os resultados obtidos para os novos tempos de disparo.

TABELA 3.3 - Compensação da proteção

Teste	$V_{\text{eficaz}}^{\text{eq}}$ (pu)	Trip (s)- convencional	V^{trip} (pu)	Trip (s) - compensado
1	1.144	2150	0.919	∞
2	1.309	55.92	1.253	1695
3	1.423	13.92	1.324	49.2

3.6 - VIBRAÇÕES E RUÍDOS

Num sistema de potência perfeitamente senoidal os bancos de capacitores normalmente não apresentam problemas criados por vibrações e tampouco produzem ruídos significativos nas imediações da instalação.

Nos sistemas elétricos poluídos os capacitores apresentam vibrações bem como ruídos na faixa audível que em princípio devem ter baixas amplitudes não tendo portanto merecido muita atenção por parte dos usuários. Todavia com o crescente aumento de cargas não lineares os efeitos citados podem atingir proporções preocupantes e devem ser tratados com cautela. Recomenda-se, portanto, ficar atento no sentido de evitar níveis de ruídos considerados insalubres bem como prevenir as instalações de bancos de capacitores dos efeitos das vibrações mecânicas que podem interferir na fixação das unidades nas estruturas, nos conectores dos contatos elétricos e até mesmo comprometer a vida útil do equipamento.

As vibrações e os ruídos audíveis gerados nos capacitores, são provocados pela ação da força atrativa e repulsiva entre as placas do capacitor. Nestas condições, considerando-se a representação simplificada ilustrada na figura 3.7, verifica-se que o valor da capacitância varia em função do movimento entre as placas na direção e a força de atração resultante entre elas pode ser avaliada através da expressão (3.17), apresentada na referência [08] .



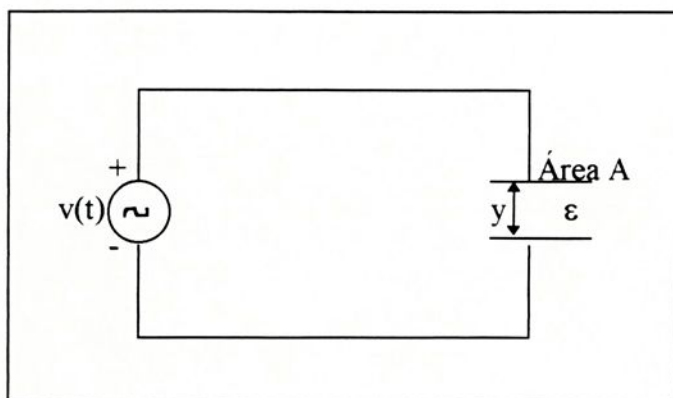


Figura 3.7 - Capacitor com placas paralelas

$$f(t,y) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{d^2} v^2(t) \quad (3.17)$$

onde:

A- $L_1 L_2$ é a área das placas

d - distância entre as placas

ϵ - permissividade do dielétrico

v - tensão aplicada

Normalmente, as placas são confeccionadas com finas folhas de alumínio, e o dielétrico pode ser uma combinação de vários materiais isolantes tais como o plástico, papel e outros, montadas numa caixa hermeticamente fechada. O capacitor propriamente dito, normalmente é constituído de uma associação de várias unidades em série, ou paralelo, ou ambas com o objetivo de se obter a capacitância desejada. Desta forma, o efeito combinado das unidades intensificam os fenômenos de vibrações e ruídos, na medida em que o nível de distorção harmônica presente no barramento de alimentação aumenta, como mostra a expressão (3.17).

O fenômeno é particularmente intensificado quando alguma frequência de excitação coincidir ou aproximar-se da frequência natural de oscilação do conjunto formado pelas placas e/ou caixa.

A referência [08] apresenta resultados experimentais obtidos para uma estrutura de um capacitor convencional mediante análise modal, utilizando-se um excitador eletromecânico como fonte de excitação da estrutura. Pelos resultados obtidos é possível constatar que as frequências naturais de oscilação encontram-se dentro da faixa audível, como ilustra a função de resposta em frequência (FRF) apresentada na figura 3.8.

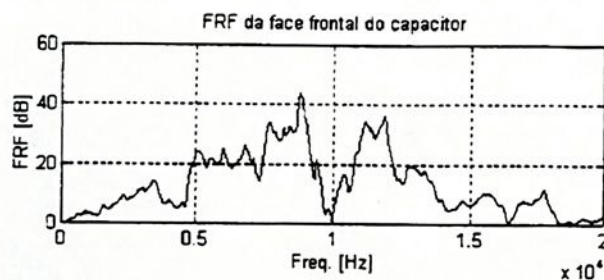


Figura 3.8 - Função de resposta em frequência da estrutura de um capacitor (FRF).
Faixa audível

Para a condição de ressonância basta que a tensão de alimentação do banco de capacitores apresente algum componente harmônico nesta faixa de frequência. Considerando-se as frequências normalmente presentes nos sistemas elétricos poluídos é possível constatar a possibilidade de ocorrência dos efeitos citados. A figura 3.9 ilustra a faixa audível e sujeita a excitação pelos harmônicos do sistema elétrico.

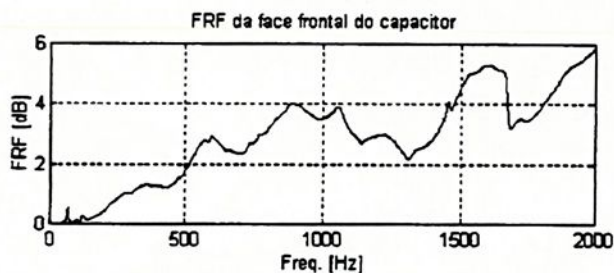


Figura 3.9 - Função de resposta em frequência da estrutura de um capacitor
Faixa audível e sujeita a excitação.

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se os resultados simulados para um sistema industrial simplificado com o objetivo de ilustrar o comportamento das correntes e tensões nos bancos de capacitores utilizados para a correção do fator de potência. Para isto foi utilizado um programa de simulação digital de fluxo harmônico bastante difundido no setor elétrico mundial e utilizado por algumas concessionária de energia elétrica no Brasil. Trata-se do “software Harmonic Propagation” modificado, ou simplesmente HARMOD apresentado no capítulo 2 deste trabalho.

4.2. - SOFTWARE DE APOIO

Para atender as peculiaridades deste trabalho incorporou-se a este software algumas rotinas especiais para visualização das formas de onda no tempo bem como para o cálculo dos valores eficazes, valores de pico e índices de distorção como apresentado no capítulo 3.

Estas rotinas foram desenvolvidas em um ambiente gráfico interativo e constituem uma interessante interface para visualização dos resultados obtidos através do HARMOD. A tela básica para entrada de dados e visualização de resultados é ilustrada na figura 4.1

4.3 - SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

O sistema ilustrado na figura 4.2 foi utilizado para ilustração de alguns problemas e possíveis soluções quando da utilização de capacitores em sistema elétricos sujeitos a poluição harmônica. Este sistema possui um conversor estático de seis pulsos alimentando uma carga de 10 MW. No mesmo barramento encontram-se também conectadas uma carga fixa com potência de 8 MVA e fator de potência de 0,8 indutivo e uma carga cuja demanda varia desde zero até 3 MVA e apresenta baixo fator de potência durante todo ciclo de operação.



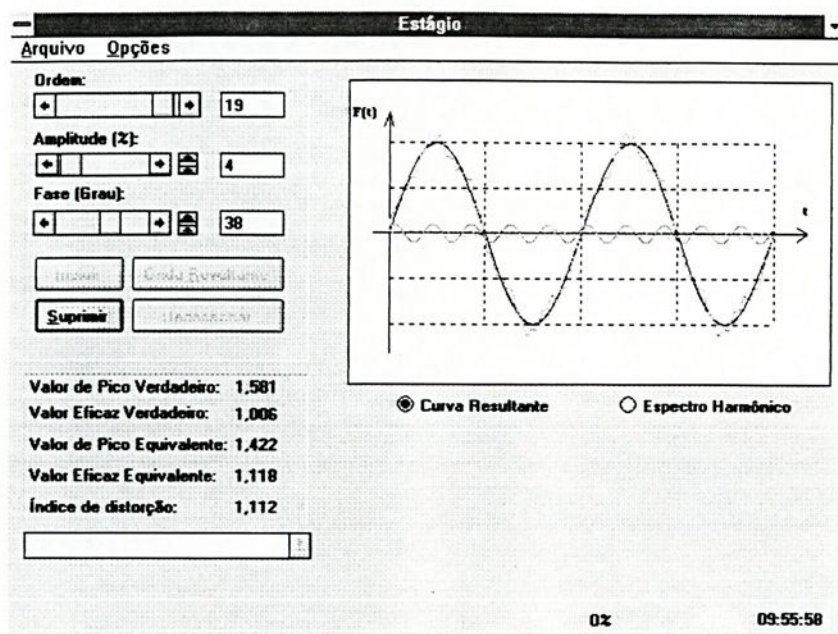


Figura 4.1 - Tela básica do software de apoio

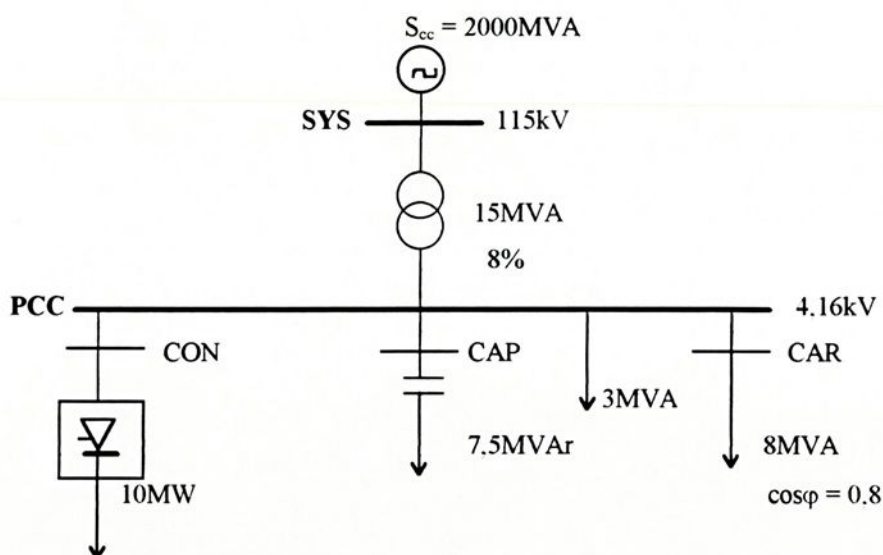


Figura 4.2 - Sistema elétrico industrial

Para dar prosseguimento, as análises dentro do espaço deste trabalho, admitiu-se que os estudos de adequação do fluxo de potência reativa tenham indicado a instalação de um banco de capacitores de 7,5 MVar no barramento PCC para manutenção do fator de potência em torno de 0,98 durante a 80% do ciclo de carga.

A título de ilustração considerou-se uma determinada condição de operação onde a carga variável possui uma demanda nula e utilizou-se o programa de fluxo harmônico

(HARMOD) para investigar o desempenho do sistema e particularmente do banco de capacitores sob o ponto de vista das distorções harmônicas.

A fonte de corrente harmônica neste caso é o conversor estático de seis pulsos o qual, como se sabe [05], absorve corrente com elevado conteúdo harmônico, sendo que as ordens harmônicas características são dadas por $6K \pm 1$, onde K é um número inteiro qualquer. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas a seguir:

HARMÔNICO INICIAL	2,00000
HARMÔNICO FINAL	15,00000
INTERVALO HARMÔNICO	1,00000
INTERVALO PARA SAÍDA GRÁFICA ..	60,00000 Hz
FREQUÊNCIA NOMINAL DO SISTEMA ..	60,00000 Hz
POTÊNCIA BASE	100,00000 MVA

DADOS DE LINHA					
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	RR (pu)	REAT. IND. (pu)	SUSCEP. CAP (pu)	CÓDIGO LINHA
PCC	CAP	,00100	,00010	,00000	
PCC	CON	,00100	,00100	,00000	
PCC	CAR	,00100	,00010	,00000	

***** TRANSFORMADORES *****							
BARRA EMISS.	BARRA RECEP.	MODEL	Rs (pu)	Rp (pu)	Xt (pu)	Bc (pu)	Kt
SYS	PCC	4	,00000	98,84000	,53000	,00000	27,64000

* OS VALORES EM PU ESTÃO REFERIDOS A BASE DE 100 MVA

BANCOS DE CAPACITORES	
BARRA	SUSCEPT. (pu)
CAP	,07500

***** CARGAS SHUNT *****		
BARRA	RR (pu)	XX (pu)
CAR	10,00000	7,50000
SYS	,00010	,00856

***** CARGAS ESPECIAIS *****	
------------------------------	--

***** CONVERSORES *****									
BARRA	TENSÃO PRIMÁRIA (kV)	TENSÃO SECUND. (kV)	POT. TRAFO (MVA)	REATÂNCIA A.C. (%)	ANGULO DEFAS. OHMS	ANGULO DEFAS. (GRAUS)	CORRENTE LADO D.C (AMP.)	ANGULO DISPARO (GRAUS)	ANGULO COMUT. (GRAUS)
CON	4,16	4,16	12,00	5,000	,07	,000	1900,00	10,00	10,24

- * TENSÃO BASE NO BARRAMENTO = 4,16 kV
- * VALORES EM OHMS ESTÃO REFERIDOS AO LADO SECUNDÁRIO.
- * VALORES % (S) NA BASE DO TRANSFORMADOR.


```

***** CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS *****
***** E *****
***** TENSÕES HARMÔNICAS APLICADAS *****

```

```

*****
INJEÇÃO DE CORRENTES DEVIDO A CONVERSORES
*****

```

CORRENTES INJETADAS NA BARRA CON			
HARMÔNICO	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
1	,10660	344,31310	
5	,02067	101,53130	
7	,01431	70,09336	
11	,00827	7,03520	
13	,00655	155,37020	

```

*****
R E S U L T A D O S
*****

```

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 5,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00043	176,65520	
PCC	,73507	176,72760	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 5,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,01004	266,78910
PCC	CAP	,27570	266,70450
PCC	CON	,02067	281,53070
PCC	CAR	,01895	101,67930
CAR		,01894	101,66030
SYS		,01004	86,78905
CAP		,27570	266,70610

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 7,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00004	341,00350	
PCC	,06030	341,05520	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 7,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00059	71,09914
PCC	CAP	,03167	71,02846
PCC	CON	,01431	250,09230
PCC	CAR	,00113	261,85020
CAR		,00113	261,84050
SYS		,00059	251,09920
CAP		,03167	71,02515

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 11,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00001	277,19970	
PCC	,01288	277,23270	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 11,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00008	7,26059
PCC	CAP	,01063	7,18459
PCC	CON	,00827	187,03520
PCC	CAR	,00015	194,12790
CAR		,00015	194,14450
SYS		,00008	187,26060
CAP		,01063	7,18535

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 13,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00000	65,48569	
PCC	,00798	65,51354	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 13,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00004	155,53720
PCC	CAP	,00779	155,45680
PCC	CON	,00655	335,37010
PCC	CAR	,00008	341,42470
CAR		,00008	341,37010
SYS		,00004	335,53720
CAP		,00779	155,45760

***** TABELAS DE DISTORÇÕES DE CORRENTE E TENSÃO *****			
--	--	--	--

DISTORÇÃO DE TENSÃO	
BARRA	DISTORÇÃO (%)
SYS	,04311
PCC	73,76968
CAP	73,78362
CON	73,77909
CAR	73,76827

** DISTORÇÃO DE CORRENTE **		
BARRA EMISS.	BARRA RECEPT	DISTORÇÃO (%)
SYS	PCC	1,00534
PCC	CAP	27,78242
PCC	CON	2,72616
PCC	CAR	1,89816
CAR		1,89741
SYS		1,00533
CAP		27,78295

Os níveis de distorção harmônica tanto de tensão como de corrente no barramento de acoplamento com a concessionária, SYS, não apresentam nenhum problema com relação aos limites toleráveis. Entretanto, no interior do sistema elétrico, o alto fator de distorção de tensão, 73,8% resultante no barramento PCC revela uma possível ressonância harmônica que pode resultar em altos valores de pico na tensão de alimentação do banco de capacitores.

Observando-se as tensões harmônicas individuais nos diferentes barramentos constata-se que o elevado fator de distorção encontrado no PCC se deve fundamentalmente a tensão de 5 harmônico. Nestas condições verifica-se também que o maior fator de distorção de corrente, aproximadamente 28%, ocorre também nos capacitores e é definido praticamente pela corrente de 5 harmônica.

Estes resultados confirmam a existência de uma ressonância na frequência de 5 harmônica (300 Hz), tornando-se então necessária uma investigação mais cuidadosa no sentido de avaliar as conseqüências sobre o banco de capacitores.



Os resultados para a forma de onda da tensão e corrente assim como seus valores de pico e eficazes, obtidos com o uso do software de apoio, são ilustrados na figura 4.3.

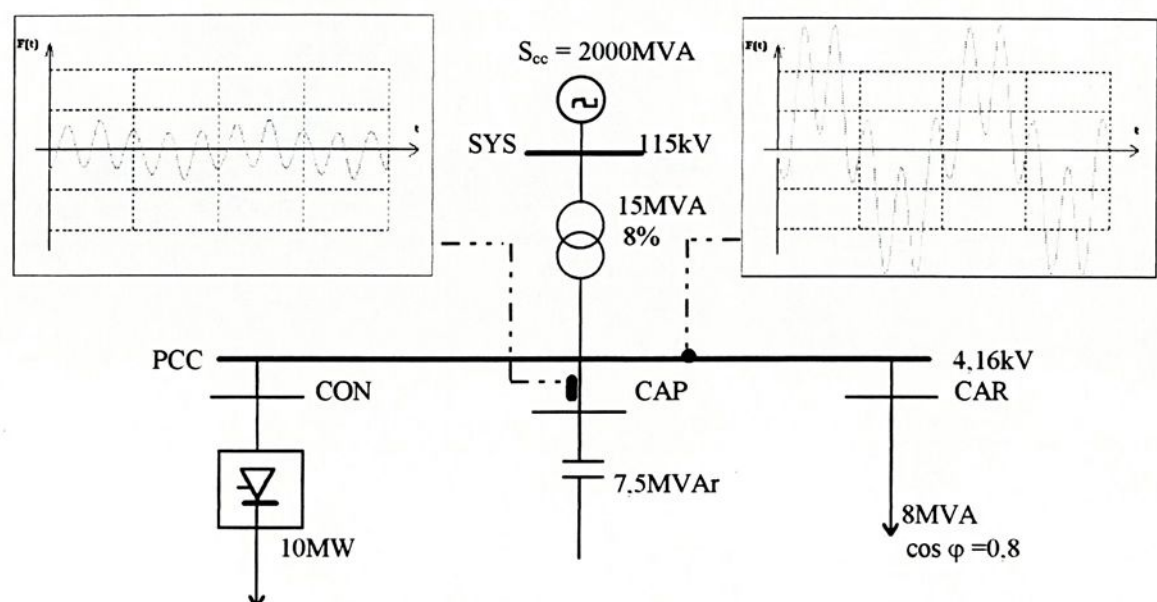


Figura 4.3 - Tensão e corrente no banco de capacitores

Tomando como bases os dados nominais do banco de capacitores observa-se que a tensão de alimentação resultante no barramento CAP apresenta um valor eficaz de 1,240 pu e um valor de pico de 2,24 pu, sendo ambos acima dos limites estabelecidos pela norma ANSI/IEEE 18-1980

Por outro lado a corrente apresenta um valor eficaz bastante elevado, cerca de 3,54 pu, estando portanto bem acima dos limites estabelecidos pela norma.

Todavia, tanto para a tensão como para a corrente os altos valores encontrados se devem, como citado anteriormente, a uma ressonância na frequência de 5 harmônica.

Investigando-se agora sob o ponto de vista da resposta em frequência do equivalente de sistema a partir da barra (PCC) de carga é possível constatar de fato a ocorrência de uma ressonância paralela para o 5 harmônico, como mostra a figura 4.4.

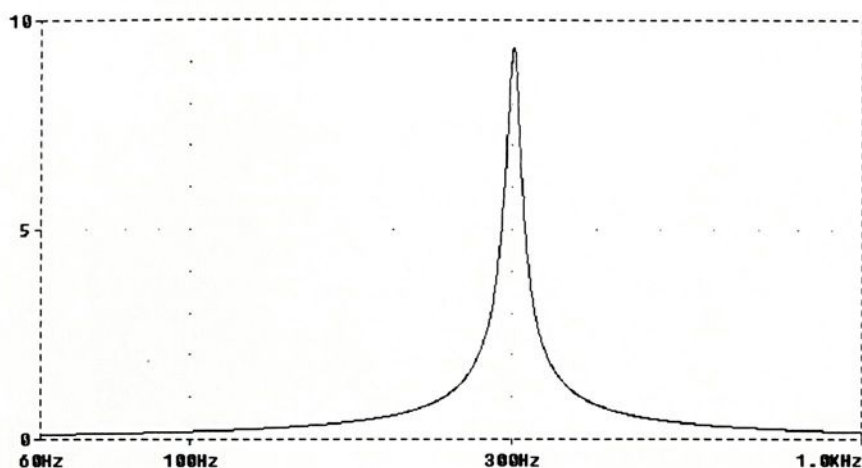


Figura 4.4 - Resposta em frequência do sistema na barra PCC

Os problemas decorrentes desta condição operativa, apresentados no capítulo 3, revelam a necessidade de providências no sentido de eliminar ou minimizar seus efeitos sobre o desempenho global do sistema elétrico e particularmente sobre o banco de capacitores.

Com o objetivo de minimizar os efeitos nocivos desta ressonância, incluiu-se um indutor em série com o banco de capacitores no sentido de deslocar o ponto de ressonância para uma frequência não característica da fonte geradora de harmônica. Este procedimento, denominado sintonia do banco de capacitores, é muitas vezes recomendado por ser relativamente simples de ser implementado e não requer grandes alterações no arranjo básico da instalação.

A figura 4.5 ilustra a nova resposta em frequência para este arranjo.

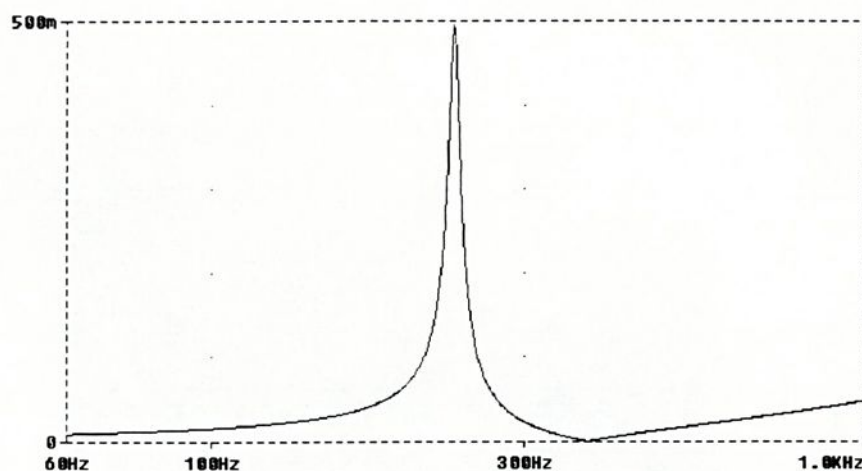


Figura 4.5 - Resposta em frequência com o banco de capacitores sintonizado

O programa HARMOD foi novamente utilizado, considerando-se agora o banco de capacitores sintonizados conforme citado anteriormente e os resultados para as tensões e correntes nesta nova condição operativa é apresentado nas tabelas a seguir:

***** R E S U L T A D O S *****

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 5,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00002	12,21466	
PCC	,03377	12,28709	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 5,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00046	102,34850
PCC	CAP	,03425	102,22900
PCC	CON	,02067	281,53120
PCC	CAR	,00087	297,24440
CAR		,00087	297,21980
SYS		,00046	282,34850
CAP		,03425	102,22900

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 7,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00000	159,84830	
PCC	,00621	159,90010	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 7,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00006	249,94400
PCC	CAP	,01252	70,01564
PCC	CON	,01431	250,09340
PCC	CAR	,00012	80,68968
CAR		,00012	80,68526
SYS		,00006	69,94395
CAP		,01252	70,01564

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 11,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00001	96,83269	
PCC	,01458	96,86559	

CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 11,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ANGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00009	186,89350
PCC	CAP	,00559	6,88757
PCC	CON	,00827	187,03520
PCC	CAR	,00018	13,76327
CAR		,00018	13,77741
SYS		,00009	6,89352
CAP		,00559	6,88757

TENSÕES HARMÔNICAS DE ORDEM 13,0			
BARRA	MODULO (PU)	ANG (GRAUS)	
SYS	,00001	245,18880	
PCC	,01485	245,21660	



CORRENTES HARMÔNICAS DE RAMO DE ORDEM 13,0			
BARRA EMISSORA	BARRA RECEPT	CORRENTE (PU)	ÂNGULO (GRAUS)
SYS	PCC	,00008	335,24020
PCC	CAP	,00424	155,23300
PCC	CON	,00655	335,37030
PCC	CAR	,00015	161,02030
CAR		,00015	161,07310
SYS		,00008	155,24020
CAP		,00424	155,23300

***** TABELAS DE DISTORÇÕES DE CORRENTE E TENSÃO *****

DISTORÇÃO DE TENSÃO		
BARRA	DISTORÇÃO (%)	
SYS		,00235
PCC		4,01525
CAP		9,72126
CON		4,01463
CAR		4,01518

** DISTORÇÃO DE CORRENTE **		
BARRA EMISS.	BARRA RECEPT	DISTORÇÃO (%)
SYS	PCC	,04802
PCC	CAP	3,71410
PCC	CON	2,72639
PCC	CAR	,09089
CAR		,09080
SYS		,04802
CAP		3,71410

Como esperado os resultados são sensivelmente melhores. Particularmente no barramento CAP, os níveis de distorção harmônica diminuíram significativamente, totalizando 9,7% para a tensão e 3,7% para a corrente.

A formas de ondas de tensão e corrente nos capacitores são apresentados na figura 4.6. Os valores eficaz e de pico da tensão sobre os capacitores apresentam agora níveis de aproximadamente 1,0 p.u. e 1,456 p.u. respectivamente, sendo portanto compatíveis com os limites estabelecidos pela norma. A corrente eficaz nos capacitores foi substancialmente atenuada permanecendo em cerca de 1,11 pu, também compatível com a norma.

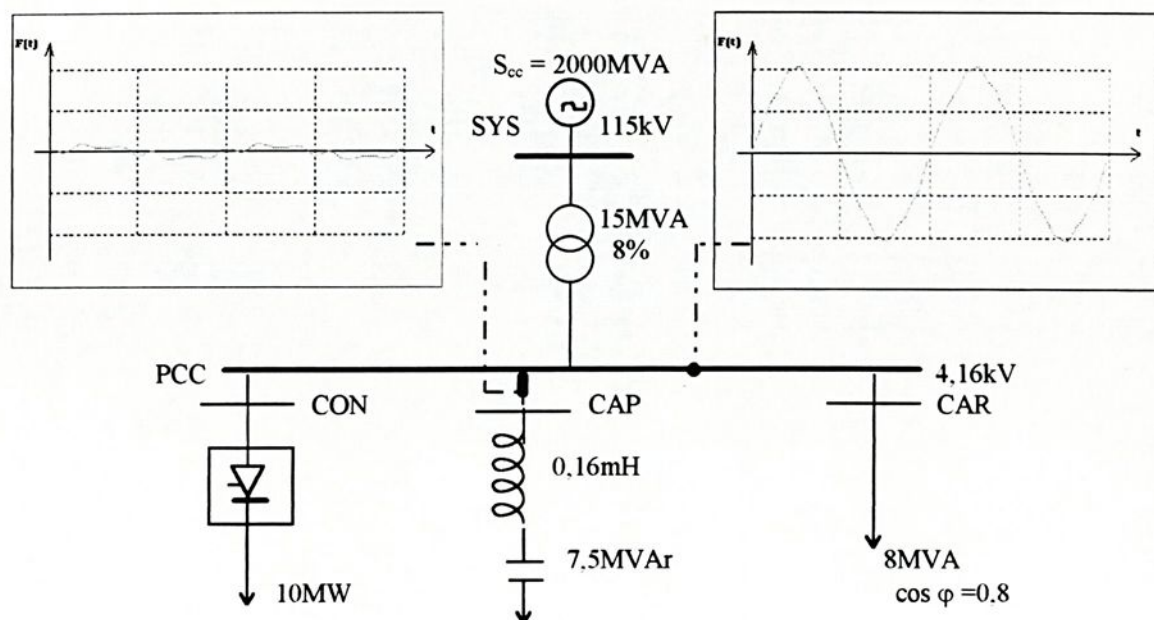


Figura 4.6 - Tensão e corrente no banco de capacitores

O exemplo apresentado ilustra um procedimento bastante comum e freqüentemente recomendado em várias aplicações práticas para adequação dos níveis de distorção harmônica que é a sintonia do banco de capacitores, entretanto outros procedimentos podem ser adotados visando o mesmo objetivo.

Ações tais como redimensionamento e/ou relocação dos bancos de capacitores também podem contribuir para a adequação dos limites de distorção harmônicas. Destaca-se entretanto que estes procedimentos estão associados a sistemas elétricos cujas dimensões e diversidade de cargas possibilitem estudos de viabilidade técnico-econômica envolvendo ações dessa natureza.

Normalmente os problemas com harmônicos em sistemas de energia elétrica aparecem primeiro sobre os bancos de capacitores e se traduzem, no mínimo, em uma acentuada perda de vida útil. O principal motivo para isto é que os capacitores apresentam uma reatância que varia inversamente proporcional a frequência e muitas vezes formam com os demais componentes do sistema elétrico circuitos ressonantes que amplificam os níveis de correntes e/ou tensões harmônicas.

Sob determinadas condições operativas, notadamente em condições de ressonância, as altas correntes nos capacitores provocam sobreaquecimentos que podem comprometer significativamente a vida útil do equipamento. Por outro lado tem sido observado uma queima freqüente dos fusíveis de uma ou mais unidades do banco, podendo levar uma total indisponibilidade.

A sobretensão harmônica também é um problema muito comum nos bancos de capacitores. São decorrentes de ressonâncias paralelas nos circuitos elétricos formados pelos capacitores e os demais componentes do sistema e levam a um aumento da solicitação do isolamento produzindo descargas parciais e sobreaquecimento generalizado. Por outro lado, os elevados valores de pico presentes nestes casos prejudicam o funcionamento adequado da proteção, resultando em geral em uma sobreproteção. Sob condições mais severas, pode ocorrer a destruição de uma ou mais unidades capacitivas por explosão devido a expansão de gases.

Quando os níveis de distorção não estão dentro dos limites aceitáveis, a característica de resposta em frequência do sistema elétrico pode ser alterada mediante alterações na potências nominais ou das localizações dos bancos de capacitores, ou ainda pela implementação de filtros harmônicos.

Se um único e grande banco de capacitores é conectado na barra principal do sistema o número de ressonâncias é minimizado mas se a frequência de ressonância coincidir ou ficar próxima de uma frequência harmônica existente, os resultados podem ser desastrosos. Por outro lado, quando vários capacitores são conectados, por exemplo nos barramento de motores, além de levar a um número grande de frequências de ressonância, estas estarão mudando constantemente dificultando consideravelmente a análise do problema. Entretanto, nestes casos a resistência elétrica resultante na condição de ressonância normalmente é alta

fazendo com que a corrente elétrica circulante seja menor que no caso anterior. Além disto a multiplicidade de bancos de capacitores cria condições favoráveis a estudos de redimensionamento e/ou relocação das unidades, como sugerido anteriormente.

Uma outra estratégia interessante para minimizar os efeitos decorrentes de sobretensões e sobrecorrentes associadas a presença de harmônicas é a utilização de bancos de capacitores previamente sintonizados. Tal procedimento consiste na utilização de reatores em série com os capacitores, sintonizados para uma frequência específica de interesse. Caso se tenha mais de uma frequência harmônica a ser filtrada, é possível subdividir o banco de capacitores em partes menores sintonizando as mesmas nas demais frequências desejadas. Qualquer que seja o caso, o arranjo citado deve manter o fornecimento de potência reativa à frequência fundamental e criar um caminho de baixa impedância para uma ou mais correntes harmônicas. Em outras palavras tem-se simultaneamente um banco de capacitores corrigindo o fator de potência e um filtro de harmônicas.

Este procedimento requer alguns cuidados no sentido de atender os limites estabelecidos pelas normas. Recomenda-se seguir os seguintes passos:

- sintonizar o banco de capacitores para a frequência harmônica mais baixa presente no sistema, normalmente 5ª e 7ª harmônicas. Para isto é aconselhável também o uso de capacitores isolados para um nível de tensão superior a tensão nominal do sistema. Recomenda-se um nível de isolação superior a 10% da tensão nominal do sistema [09];
- verificar se o nível de distorção de tensão na barra atende o limite de 5% (distorção harmônica total-THD), estabelecido na norma IEEE Std. 519-1981;
- verificar se a corrente total nos capacitores atente os limites estabelecidos na norma IEEE Std 18-1980. Simultaneamente, investigar se os níveis de correntes harmônicas injetadas no barramento de acoplamento com a concessionária estão de acordo com a norma IEEE Std 519-1992. Caso algum limite seja violado a solução recomendada é a multiplicação do número de filtros;



- Analisar a característica de resposta de frequência do sistema para verificar se o funcionamento simultâneo dos filtros instalados não produzem novas ressonâncias paralelas.

Em sistemas elétricos sujeitos a distorções harmônicas e que dispõem de geradores síncronos ou motores, recomenda-se que a correção do fator de potência seja feita, sempre que possível, sem o uso de bancos de capacitores.

O tratamento monofásico utilizado neste trabalho e a consideração da presença, apenas, das harmônicas características, impõe limitações ao uso do programa HARMOD para estudos desta natureza. A metodologia pode ser adotada em uma investigação preliminar, todavia não dispensa um estudo mais aprofundado utilizando programas de fluxo harmônico baseados em métodos iterativos/iterativos.

A necessidade deste processo dá-se pelo fato de que as harmônicas características geradas pelas fontes tem como referência uma alimentação senoidal e equilibrada. No entanto, as próprias fontes se encarregam de alterar esta situação na medida em que sua operação implica no aparecimento de distorções harmônicas nas tensões de alimentação, fazendo com que apareçam ordens harmônicas não-características e outras ressonâncias podem ser excitadas.

Desta forma, sugere-se que estudos mais detalhados sejam realizados em trabalhos futuros utilizando ferramentas mais precisas para previsão das distorções harmônicas, como por exemplo os programas de fluxo harmônico trifásicos ou programas de simulação digital no domínio do tempo.

No tocante ao capacitor estudos adicionais devem ser desenvolvidos no sentido de estabelecer modelos mais consistentes para avaliação das perdas sob condições operativas não senoidais e a conseqüente depreciação de vida útil.

Com respeito especificamente aos grandes bancos de capacitores constituídos por várias unidades por fase, sugere-se que sejam investigados aspectos relativos a queima de fusíveis de algumas unidades provocadas pela presença de harmônicas e as conseqüentes sobretensões resultantes nas unidades restantes.



- [01] GREENWOOD, A., "Electrical Transients in Power Systems". Wiley - Interscience, 1971
- [02] CIGRÉ Working Group 36-05, "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network". Electra, N° 77, July 1979.
- [03] PIRES, F. A. C., "Uma Contribuição ao Estudo de Harmônicas em Sistemas de Potência", Tese de Doutorado, UNICAMP, Fev/1991.
- [04] ELLIS, R., G., "Harmonic Analysis of Industrial Power Systems", In: IEEE Trans on Industry Applications, Vol 32, N° 2, March/April 1996.
- [05] OLIVEIRA, L. C. O., "Fluxo Harmônico em Sistemas Elétricos de Plataformas de Prospeção e Produção de Petróleo".
- [06] BENMOUYAL, G.; BILODEAU, H.; CHANO, S.; SYBILLE, G., "New Algorithm for Protection of Capacitor Banks Exposed to Harmonic Overvoltages", In: IEEE Trans on PWRD: 898-904, 1992.
- [07] PHIPPS, J. K.; NELSON, J. P.; SEN, P. K., "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", In: IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 30, N° 2, March/April 1994.
- [08] COX, M. D.; GUAN, H. H., "Vibration and Audible Noise of Capacitors subjected to nonsinusoidal waveforms", In: IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 9, N° 2, April 1994.
- [09] BALDA, J. C.; BARNES, T. M.; EMANNUEL, A. E.; FERRARO, R. J.; GRIFFITH, D. C.; HARTMANN, D. P.; HORTON, W. F.; JEWELL, W. T.; McEACHERN, A.; PHILEGGI, D. J.; REID, W. E., "Effects of Harmonics on Equipment", In: IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 8, N° 2, April 1993.



- [10] GIRGIS, A.A.; FALLON, C. M.; RUBINO, J. C. P.; CATOE, R. C., "Harmonics and Transient Overvoltages Due to Capacitor Switching", In: IEEE Trans on Industry Applications, Vol 29, No. 6, November/December 1993.
- [11] PESSE, G., ARIZON, P.; ALVES, R., "Reducción de la Contaminación Armónica en el Sistema de Distribución de Campos de Petróleo", Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
- [12] GREBE, T. E., "Application of Distribution System Capacitor Banks and their Impact on Power Quality", Electrotek Concepts, Inc. Knoxville, Tennessee
- [13] STRATFORD, R., P., "Harmonic Pollution on Power Systems. A Change in Philosophy", In. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-16, No. 5, September/October 1980.
- [14] CAMERON, M., M., "Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering", In. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, N° 1, January/February 1993.
- [15] LINDERS, J., R., "Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment", In. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, N° 5, September/October 1979.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15378-000 ILHA SOLTEIRA - SP

