

TESE

990

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

Desenvolvimento de Software para Escolha de Bancos de Capacitores e Filtros de Harmônicos

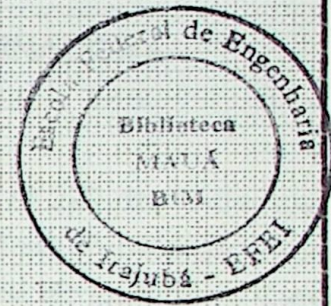
Rildo Renó Custódio

ITAJUBÁ - MG

1998



**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
EFEI**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ESCOLHA
DE BANCOS DE CAPACITORES E FILTROS DE
HARMÔNICOS**

RILDO RENÓ CUSTÓDIO

ORIENTADOR: JOÃO ROBERTO COGO

Itajubá, Novembro de 1998



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

ANEXO I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 292 de 19 de novembro de 1998, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "**Desenvolvimento de Software para Escolha de Banco de Capacitores e Filtros**" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**, satisfeitas as demais exigências regimentais, à **Rildo Renó Custódio**.

Itajubá, 20 de novembro de 1998.

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

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrizoli
2º Examinador - ANEEL

Prof. José Antonio Cortez
3º Examinador - EFEI

Prof. João Roberto Cogo
4º Examinador - EFEI - Orientador



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Desenvolvimento de Software para Escolha de Banco de Capacitores e Filtros".

Autor: Rildo Renó Custódio

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A ⁺	<i>FAPires</i>
2º	A ⁺	<i>[Signature]</i>
3º	A ⁺	<i>[Signature]</i>
4º	A ⁺	<i>[Signature]</i>

Resultado Médio: Conceito A⁺, ou seja, APROVAÇÃO COM
DISTINÇÃO

Observações: _____

Itajubá, 20 de novembro de 1998.

FAPires

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

[Signature]

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoli
2º Examinador - ANEEL

[Signature]

Prof. José Antonio Cortez
3º Examinador - EFEI

[Signature]

Prof. João Roberto Cogo
4º Examinador - EFEI - Orientador

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar a minha gratidão a todas as pessoas que, direta ou indiretamente tornaram possível esta dissertação de mestrado.

- . Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo.
- . Ao Prof. João Roberto Cogo pela orientação.
- . Ao Prof. Jamil Haddad pela concessão da sala de trabalho e pela atenção dispensada.
- . Ao Prof. Valberto Ferreira da Silva pelo apoio, interesse e atenção.
- . A Prof. Rosa Maria Campos Gonçalves pela paciência e atenção na correção do texto.
- . Aos funcionários da EFEI que sempre me atenderam com atenção.
- . Aos amigos Antônio, Roubério e Roberto pela estima e amizade.
- . Aos Profs. José Policarpo Gonçalves de Abreu e Ângelo José Resek

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

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ESCOLHA DE BANCOS DE CAPACITORES E FILTROS DE HARMÔNICOS

Rildo Renó Custódio

1998

Orientador: João Roberto Cogo
Departamento: Engenharia Elétrica

RESUMO

Desenvolveu-se para esta dissertação de mestrado, um programa computacional que, juntamente com o programa MICROTRAN, calcula os parâmetros dos filtros a serem instalados num sistema elétrico de potência, visando à correção do fator de potência e/ou à diminuição dos seus níveis de harmônicos.

Apresentam-se breves análises sobre bancos de capacitores e qualidade de energia elétrica.

Apresenta-se também o procedimento, passo a passo, para a instalação de filtros visando à correção do fator de potência e à diminuição dos níveis de harmônicos de um sistema elétrico.

A dissertação tem como ápice a apresentação do programa desenvolvido, denominado MTFILTRO. Demonstra-se a utilidade do programa, através da comparação feita com exemplos executados manualmente.

Sendo assim, o objetivo é fornecer aos profissionais que atuam na área de sistemas elétricos, uma ferramenta que facilite a obtenção dos parâmetros dos filtros a se instalarem, visando à correção do fator de potência e/ou à diminuição dos níveis de harmônicos.

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

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CHOOSE OF CAPACITOR BANKS AND HARMONIC FILTERS

Rildo Renó Custódio

1998

Supervisor: João Roberto Cogo
Departament: Electrical Engineering

ABSTRACT

It was developed to this master's dissertation a computer program which along with MICROTRAN program calculates parameters of filters to be installed in an electric power system, aiming for the correction of the power factor and/ or the reduction of its harmonic levels.

Brief analysis about Capacitor Banks and quality of electric energy are presented.

It is also presented a step-by-step procedure to the installation of filters with the purpose of correcting the power factor aiming for the reduction of harmonic levels of an electric system.

The dissertation reaches its zenith with the introduction of a program developed called MTFILTRO. The usefulness of this program is demonstrated by the comparison with examples performed by hand.

Therefore, the purpose is provide a tool to professionals who work with electric systems that will make it easier to get parameters of filters to be installed, aiming for the correction of the power factor and/or the reduction of the harmonic levels.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

1 - Considerações sobre os sistemas elétricos de potência	02
1.1 - Nível de transmissão	02
1.2 - Nível de distribuição	03
1.3 - Nível de subtransmissão	03
2 - Considerações sobre a carga de um sistema elétrico de potência	04
2.1 - Cargas elétricas normais	04
2.2 - Cargas elétricas especiais	05
3 - Qualidade de energia elétrica	06
3.1 - Confiabilidade	06
3.1.1 - Estados de um sistema de potência	07
3.1.2 - Fatores que afetam a confiabilidade de um sistema elétrico	08
3.1.3 - Considerações finais acerca de confiabilidade	09
3.2 - Frequência constante	10
3.3 - Tensão constante	10
3.3.1 - Quedas de tensão	11
3.3.2 - Flutuações de tensão (Flicker)	13
3.3.3 - Desequilíbrio de tensões	13
4 - Harmônicos de tensão e corrente num sistema elétrico	17
4.1 - Série trigonométrica de Fourier	17
4.1.1 - Propriedades da série trigonométrica de Fourier	18
4.1.2 - Considerações sobre a série trigonométrica de Fourier	18
4.1.3 - Exemplos	19
4.2 - Causas	23
4.3 - Modelagem para estudo de harmônicos	30
4.4 - Problemas criados por harmônicos	32
4.5 - Formas de se minimizar os efeitos dos harmônicos	33
5 - Fator de potência	34
5.1 - Conceituação do fator de potência	34
5.2 - Conceituação do fator de deslocamento	34
5.3 - Fator de potência sem a presença de harmônicos	35
5.4 - Fator de potência na presença de harmônicos	35
5.5 - Razões para se ter um alto fator de potência	36
5.6 - Maneiras de se aumentar o fator de potência	38
5.6.1 - Localização dos bancos de capacitores	38
6 - Legislação envolvendo fator de potência e harmônicos	40
6.1 - Harmônicos	40
6.2 - Fator de potência	41

CAPÍTULO II - BANCOS DE CAPACITORES E FILTROS

1 - Capacitores de potência	44
1.1 - Características gerais	44
1.1.1 - Corrente no capacitor	45

1.1.2 - Energia armazenada e potência no capacitor	48
1.1.3 - Associação de capacitores	50
1.1.4 - Potência, reatância capacitiva e as perdas no capacitor	50
1.2 - Proteção dos bancos de capacitores	51
1.2.1 - Considerações acerca de fusíveis	52
1.2.2 - Considerações acerca de relés	53
1.3 - Conexões dos bancos de capacitores	53
1.3.1 - Conexão delta	53
1.3.2 - Conexão estrela isolada	54
1.3.3 - Conexão estrela aterrada	55
1.3.4 - Conexão dupla estrela isolada	56
1.3.5 - Conexão dupla estrela aterrada	57
1.4 - Chaveamento de bancos de capacitores	58
1.5 - Especificação de bancos de capacitores	60
1.6 - Ensaios principais dos bancos de capacitores	61
1.6.1 - Ensaios de rotina	61
1.6.2 - Ensaios de tipo	62
2 - Ressonância devido a harmônicos	63
2.1 - Ressonância série	63
2.2 - Ressonância paralela	65
3 - Bancos de capacitores para correção do fator de potência	70
3.1 - Caso sem harmônicos	71
3.2 - Caso com harmônicos	74
3.2.1 - Metodologia para correção do fator de potência	76
4 - Filtro de harmônicos	78
4.1 - Classificação dos filtros	78
4.1.1 - Tipo série	78
4.1.2 - Tipo derivação (shunt)	78
4.2 - Classificação quanto ao fator de qualidade (F Q)	80
4.2.1 - Sintonizados	80
4.2.2 - Amortecidos	80
4.3 - Procedimento para escolha de filtros de harmônicos	82

CAPÍTULO III - EXEMPLOS

Exemplo 1	89
Exemplo 2	106
Exemplo 3	111
Exemplo 4	113
Exemplo 5	124
Exemplo 6	131
Exemplo 7	135
Exemplo 8	138

CAPÍTULO IV - O PROGRAMA MTFILTRO

1 - Objetivos e resultados obtidos	142
------------------------------------	-----

2 - Pré-requisitos de funcionamento	142
3 - Como usar o programa MTFILTRO	143
3.1 - Caso de simulação ou caso de medição	143
3.1.1 - Caso de simulação	143
3.1.2 - Caso de medição	145
3.2 - Comparação com norma	145
3.3 - Instalação de filtros com objetivo de correção do fator de potência	146
3.4 - Instalação de filtros com objetivo de diminuição dos fatores de distorção de tensão	147
3.4.1 - Instalação de filtro tipo sintonizado	148
3.4.2 - Instalação de filtro tipo amortecido	148
3.5 - Etapa de verificação de U_{teste} e Q_{teste} para os filtros de harmônicos	151
3.6 - Etapa de verificação de contingências	151
4 - Programas utilizados por MTFILTRO	152
4.1 - Programa CORFILT EXE	152
4.2 - Programa DISTORC EXE	152
4.3 - Programa COMPARAR EXE	152
4.4 - Programa MNORMA EXE	153
4.5 - Programas CAPA1 EXE, CAPA2 EXE e CAPA3 EXE	153
4.6 - Arquivos AUXI TPU, RILDO TPU e DIST TPU	153
4.7 - Programas MIF1 EXE, MIF2 EXE e CONTING EXE	153

CAPÍTULO V - EXEMPLOS COM MTFILTRO

Exemplo 1	155
Exemplo 2	169
Exemplo 3	173
Exemplo 4	175
Exemplo 5	179
Exemplo 6	182
Exemplo 7	186
Exemplo 8	190

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

Conclusões	193
------------	-----

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	195
ANEXOS	199

SIMBOLOGIA

- A - Área;
- a - Fator pela qual a tensão no banco de capacitores é maior que a da rede;
- a_0/s - Valor médio da função periódica a ser decomposta em série trigonométrica de Fourier;
- a_n - Coeficiente de ordem n para o termo em cosseno da série trigonométrica de Fourier;
- b_n - Coeficiente de ordem n para o termo em seno da série trigonométrica de Fourier;
- BC - Banco de capacitores;
- C - Capacitância do capacitor;
- C_0 - Capacitância do capacitor cujo dielétrico é o vácuo;
- C_{eq} - Capacitância equivalente;
- C_i - Capacitância individual para a i-ésima unidade capacitiva;
- C_n - Módulo do harmônico de ordem n;
- d - Distância entre os eletrodos;
- $c(t)$ - Tensão instantânea da fonte;
- E_{ab}, E_{bc}, E_{ca} - Valor eficaz da tensão de linha;
- E_{an}, E_{bn}, E_{cn} - Valor eficaz de tensão da fase;
- E_C - Energia armazenada no capacitor;
- $E_{máx}$ - Valor de pico da tensão da fonte;
- F_{desl} - Fator de deslocamento;
- f - Frequência;
- FD_m - Fator individual de distorção de corrente para um harmônico de ordem n;
- FD_u - Fator individual de distorção de tensão para um harmônico de ordem n;
- FD_i - Fator total de distorção de corrente;
- FD_u - Fator total de distorção de tensão;
- F.P. - Fator de potência;
- $F.P.^{desejado}$ - Valor desejado para o fator de potência;
- f_n - Frequência para um harmônico de ordem n;
- F.Q. - Fator de qualidade;
- I - Corrente elétrica;
- I_{BC} - Corrente pelo banco de capacitores;
- I_C - Corrente de carga;
- I_{RC} - Componente ativa da corrente de carga;
- I_{XC} - Componente reativa da corrente de carga;
- I_1 - Corrente à Frequência fundamental;
- $i(t)$ - Valor instantâneo de corrente;
- I_d - Corrente de carga para uma ponte retificadora;
- I_{ef} - Valor eficaz da corrente;
- K - Constante dielétrica do material isolante;
- L - Indutância;
- n - Ordem do harmônico;

P	- Potência ativa;
$p(t)$	- Potência instantânea;
P_C	- Potência ativa de carga;
Q	- Potência reativa;
q	- Carga armazenada no capacitor;
Q_{BC}	- Potência reativa do B.C.;
Q_{AB}	- Potência reativa a se instalar entre as fases A e B;
Q_{BC}	- Potência do B.C.;
Q_{BCN}	- Potência nominal do B.C.;
Q_{teste}	- Potência de teste;
R	- Resistência elétrica;
R_C	- Resistência representativa da carga;
R_n	- Resistência do filtro na sua Freqüência de sintonia;
R_{TH}	- Resistência equivalente de Thevenin;
R_{IHL}	- Resistência equivalente de Thevenin à Freqüência fundamental;
S	- Potência aparente;
S_{TN}	- Potência nominal do transformador;
T	- Período;
$T.C.$	- Transformador da carga elétrica especial;
$u(t)$	- Valor instantâneo da tensão;
U_{BC}	- Tensão do B.C.;
U_{BCN}	- Tensão nominal do B.C.;
U_{ef}	- Valor eficaz da tensão;
U_{fonte}	- Tensão eficaz da fonte;
$U_{máx}$	- Valor de pico da tensão da fonte;
U_1	- Tensão à Freqüência fundamental;
U_{teste}	- Tensão de teste;
V_1	- Tensão da barra 1;
V_2	- Tensão da barra 2;
v_C	- Tensão instantânea no capacitor;
v_R	- Tensão instantânea na resistência;
$v(t)$	- Tensão instantânea;
v_{TH}	- Tensão equivalente de Thevenin;
x	- Variável independente genérica;
X	- Reatância;
X_C	- Reatância capacitiva;
X_c	- Reatância representativa da carga;
X_{C1}	- Reatância capacitiva à Freqüência fundamental;
X_{cn}	- Reatância do B.C. para um harmônico de ordem n;
X_L	- Reatância indutiva;
X_n	- Reatância do filtro na sua Freqüência de sintonia;
X_{R1}	- Reatância indutiva à Freqüência fundamental;
X_{s1}	- Reatância equivalente do sistema de energia à Freqüência fundamental;
X_{TC1}	- Reatância do transformador da carga elétrica especial;
X_{TCn}	- Reatância do transformador da carga elétrica especial para um harmônico de ordem n;

- X_{zn} - Reatância do sistema de suprimento de energia para um harmônico de ordem n ;
- X_{1TE1} - Reatância do transformador à Frequência fundamental;
- X_{TH} - Reatância equivalente de Thevenin;
- X_{TH1} - Reatância equivalente de Thevenin à Frequência fundamental;
- Z_{2n} - Impedância equivalente "vista da barra 2" para um harmônico de ordem n ;
- ω - Frequência angular;
- φ_n - Diferença entre o ângulo de fase da tensão e o ângulo de fase da corrente para um harmônico de ordem n ;
- ψ_n - Fase do harmônico de ordem n ;
- θ - Ângulo em radianos;
- ε - Permissividade dielétrica;
- τ - Constante de tempo do circuito;
- σ - Ângulo de perdas;
- ξ - Valor que define a potência reativa do filtro básico na Frequência fundamental:

CAPÍTULO I

***QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA***



1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O grau de desenvolvimento das fontes de energia para realizar trabalho útil é uma das medidas do progresso industrial.

A descoberta de fontes de energia na natureza, o seu transporte em suas várias formas de um lugar para outro, e a sua conversão para uma forma de maior utilidade, são partes essenciais de uma economia industrial. O sistema elétrico de potência é uma das ferramentas para a conversão e transporte de energia.

Passando através das formas de geração (térmica, hidráulica, ...) e transmissão (corrente contínua e alternada, baixa, alta e extra-alta tensões ...), em menos de um século, o sistema elétrico evoluiu vertiginosamente em todos os países industrializados, senão caoticamente, pelo menos desordenadamente, buscando atender o estupendo crescimento das cargas.

Um sistema elétrico, conforme mostra a figura 1, opera em vários níveis de tensão, separados por transformadores. Pode-se então, dividir o sistema elétrico em três níveis básicos de tensão.

- . Nível de transmissão
- . Nível de subtransmissão
- . Nível de distribuição

1.1 - NÍVEL DE TRANSMISSÃO

O sistema de transmissão conduz os maiores blocos de potência e também promove interligações com outros sistemas elétricos. A energia pode ser conduzida, geralmente em qualquer direção desejada, nas várias malhas do sistema de transmissão, de modo a corresponder às condições de funcionamento mais econômicas ou melhor servir aos objetivos técnicos

A diferença fundamental nos objetivos do sistema de transmissão comparado com os de subtransmissão e distribuição é evidenciada na estrutura da rede. Enquanto os dois últimos são geralmente (nem sempre) de estrutura radial, o sistema de transmissão costuma ter uma estrutura em anel, pois esta permite uma maior combinação de percursos e, portanto, serve melhor aos seus propósitos.

O sistema de transmissão apresenta analogias com qualquer outro sistema de transporte, como por exemplo, o de estradas. Assim como a estrutura geográfica e a capacidade de tráfego de um sistema de estradas devem ser determinadas para as condições atuais e futuras de configuração e volume de tráfego, também um projeto de um sistema de transmissão de energia elétrica deve ser baseado nas condições atuais e futuras de configuração e volume de carga.

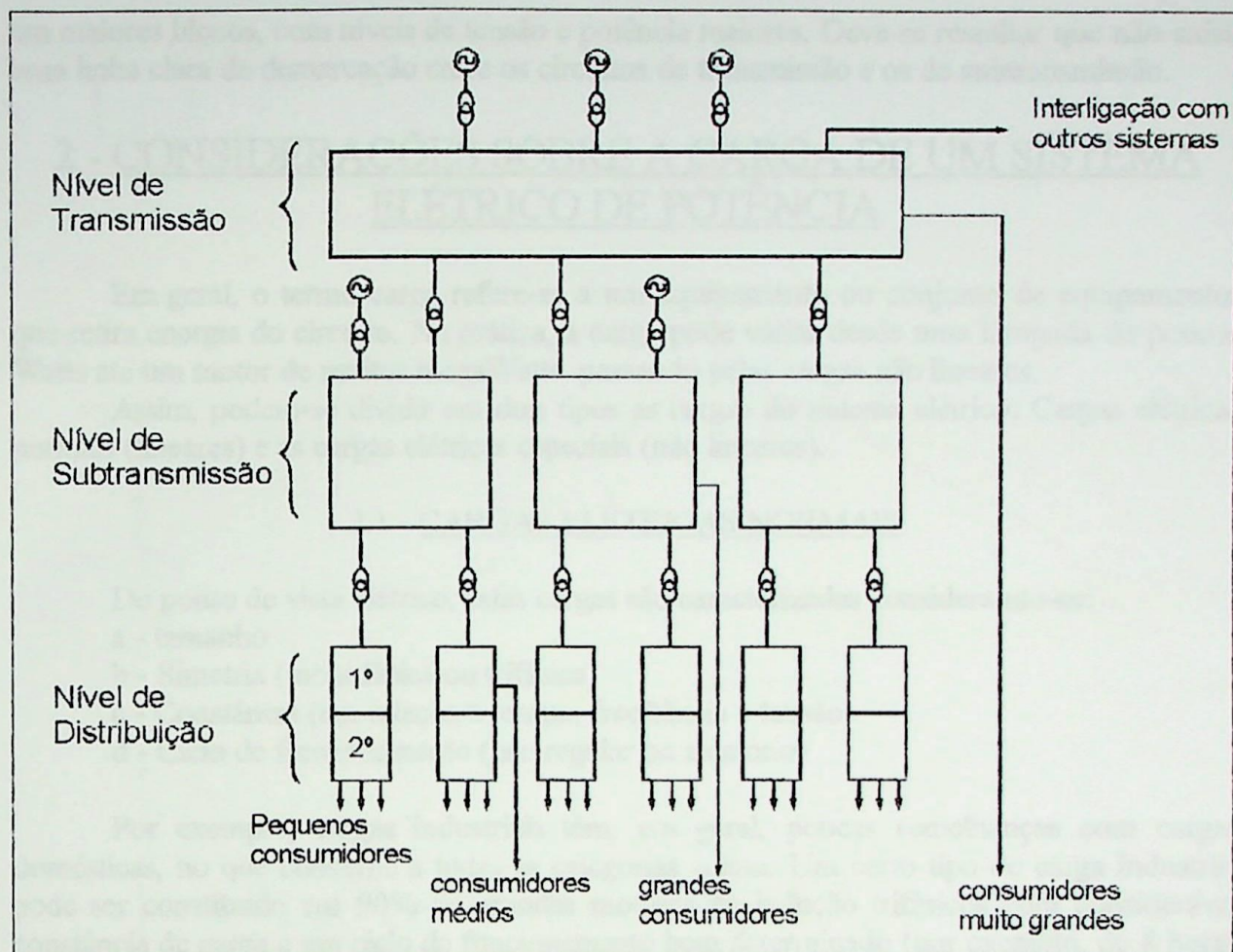


Figura 1 - Estrutura de um Sistema Elétrico de Potência.

1.2 - NÍVEL DE DISTRIBUIÇÃO

Os circuitos de distribuição, alimentados a partir das subestações de distribuição, fornecem energia aos consumidores pequenos (domésticos) e médios (pequenas indústrias e comércio) e estão divididos em dois subníveis de tensão.

- a - Tensão primária, ou de alimentação (por exemplo, 13800 [Volts])
- b - Tensão secundária, ou de consumidor (por exemplo, 220 [Volts])

A estrutura dominante neste nível é a radial.

1.3 - NÍVEL DE SUBTRANSMISSÃO

Os circuitos de subtransmissão distribuem energia às subestações de distribuição, num nível de tensão que geralmente vai até 138 [kV]. Estes recebem energia diretamente da barra do gerador na estação de geração ou por meio de subestações de potência. Os grandes consumidores são servidos diretamente neste nível.

O papel de um sistema de subtransmissão é basicamente o mesmo que o de um sistema de distribuição, exceto que a área geográfica servida é maior e a energia é distribuída



em maiores blocos, com níveis de tensão e potência maiores. Deve-se ressaltar que não existe uma linha clara de demarcação entre os circuitos de transmissão e os de subtransmissão.

2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A CARGA DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Em geral, o termo carga refere-se a um equipamento ou conjunto de equipamentos que retira energia do circuito. Na prática, a carga pode variar desde uma lâmpada de poucos Watts até um motor de muitos megaWatts, passando pelas cargas não lineares.

Assim, podem-se dividir em dois tipos as cargas do sistema elétrico: Cargas elétricas normais (lineares) e as cargas elétricas especiais (não lineares).

2.1 - CARGAS ELÉTRICAS NORMAIS

Do ponto de vista elétrico, estas cargas são caracterizadas considerando-se:

- a - tamanho
- b - Simetria (monofásica ou trifásica)
- c - Constância (em relação a tempo, frequência e tensão)
- d - Ciclo de funcionamento (uso regular ou aleatório)

Por exemplo, cargas industriais têm, em geral, poucas semelhanças com cargas domésticas, no que concerne a todas as categorias acima. Um certo tipo de carga industrial pode ser constituído em 90% de grandes motores de indução trifásicos com considerável constância de carga e um ciclo de funcionamento bem determinado (por exemplo, de 8 horas da manhã às 5 horas da tarde). Uma carga doméstica típica, ao contrário, consiste, principalmente, de aparelhos monofásicos operados aleatoriamente pelas donas de casa.

Muito embora as cargas individuais possam ser de caráter inteiramente aleatório, uma configuração média é vista pelos transformadores de distribuição, pois a este nível, no projeto, reparte-se sempre as cargas monofásicas entre as três fases. Assim, no nível de subtransmissão, a situação equilibrada é ainda mais acentuada, e no nível de transmissão, pode-se dizer que a situação é totalmente equilibrada.

De maneira resumida, têm-se as seguintes características para as cargas normais típicas de um sistema elétrico.

a - Embora individualmente de tipo aleatório, as cargas concentradas ou compostas, encontradas em nível de subtransmissão e transmissão são de caráter altamente previsível.

b - Essas cargas variam com o tempo de maneira previsível. A figura 2 mostra a variação típica de carga para uma dada concessionária de energia elétrica. Em geral, há uma variação considerável, não apenas durante as horas do dia, mas também entre os dias da semana e os domingos e feriados, e ainda entre as diferentes épocas do ano.

c - Muito embora as cargas sejam variáveis com o tempo, tais variações são relativamente lentas. De minuto a minuto tem-se uma carga quase constante. Como um minuto é um período de tempo longo comparado com as constantes elétricas de tempo, isso permite considerar o sistema elétrico funcionando em regime permanente (um regime permanente que varia lentamente durante as horas do dia, ou seja, funcionamento quase estático).

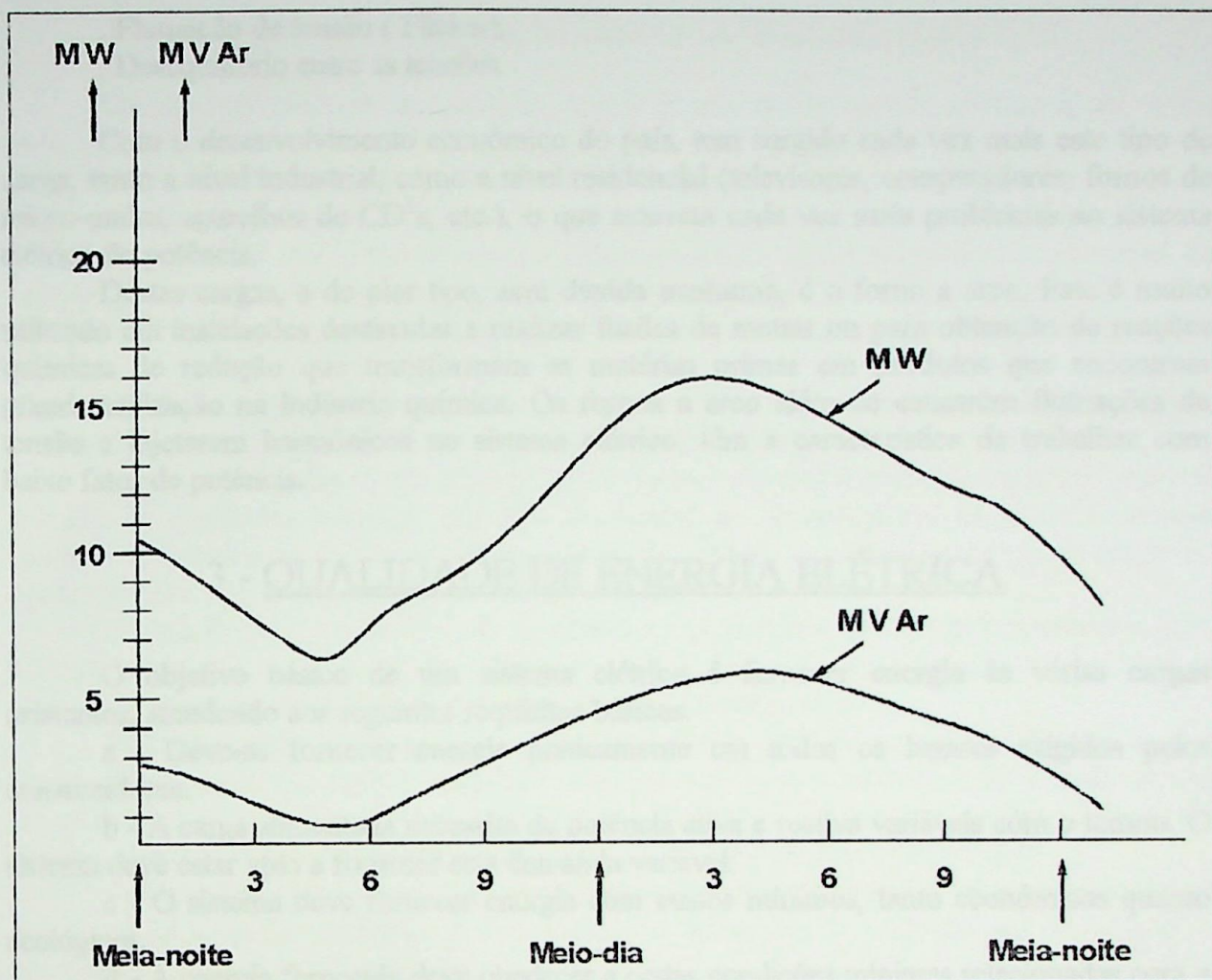


Figura 2 - Variação típica da carga durante um dia

d - A carga típica sempre consome potência reativa. A razão para isso é que carga do tipo motor é o mais importante componente da carga total. Os motores são sempre (com exceção das máquinas síncronas superexcitadas) indutivos.

e - A carga típica é sempre equilibrada. No caso de grandes motores, esta simetria é automática, visto que são projetados para funcionamento trifásico equilibrado. No caso de equipamentos monofásicos, a simetria provém da distribuição intencional entre as fases e de efeitos estatísticos.

2.2 - CARGAS ELÉTRICAS ESPECIAIS

São exemplos destes tipos de cargas : máquinas de corrente contínua alimentadas através de pontes conversoras, grandes cargas de funcionamento intermitentemente variável, soldadores, fornos a arco, etc. .

Estas cargas causam, principalmente, os seguintes problemas ao sistema elétrico:

- . Baixos fatores de potência, que originam perdas excessivas, e que podem levar também ao limite térmico de transmissão.

- . Injeção de harmônicos no sistema, que causa, como será visto adiante, inúmeros problemas à rede elétrica, a outros consumidores e ao próprio consumidor causador do problema.



- . Flutuação de tensão (Flicker).
- . Desequilíbrio entre as tensões.

Com o desenvolvimento econômico do país, tem surgido cada vez mais este tipo de carga, tanto a nível industrial, como a nível residencial (televisores, computadores, fornos de micro-ondas, aparelhos de CD's, etc.), o que acarreta cada vez mais problemas ao sistema elétrico de potência.

Destas cargas, a de pior tipo, sem dúvida nenhuma, é o forno a arco. Este é muito utilizado em instalações destinadas a realizar fusões de metais ou para obtenção de reações químicas de redução que transformam as matérias primas em produtos que encontram grande utilização na indústria química. Os fornos a arco além de causarem flutuações de tensão e injetarem harmônicos no sistema elétrico, têm a característica de trabalhar com baixo fator de potência.

3 - QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

O objetivo básico de um sistema elétrico é fornecer energia às várias cargas existentes, atendendo aos seguintes requisitos básicos.

a - Deve-se fornecer energia praticamente em todos os lugares exigidos pelos consumidores.

b - A carga alimentada necessita de potência ativa e reativa variáveis com o tempo. O sistema deve estar apto a fornecer esta demanda variável.

c - O sistema deve fornecer energia com custos mínimos, tanto econômicos quanto ecológicos.

d - A energia fornecida deve obedecer a certas condições mínimas relacionadas com a "qualidade", que é determinada por três fatores básicos:

- . Alta confiabilidade.
- . Freqüência constante.
- . Tensão constante.

3.1 - CONFIABILIDADE

O cálculo do sobredimensionamento necessário para manter um nível adequado de qualidade num sistema elétrico é geralmente denominado de cálculo de confiabilidade do sistema em questão. São os métodos, técnicas e critérios em que esses cálculos se fundamentam que realmente definem o termo confiabilidade.

Uma análise detalhada do comportamento de qualquer sistema elétrico leva à conclusão de que a maioria das falhas em seus componentes ocorrem aleatoriamente. Isto possibilita que a análise de segurança dos sistemas possa ser feita pela aplicação da teoria das probabilidades.

É usual definir confiabilidade nos seguintes termos:

"Confiabilidade" é a probabilidade de um componente, sistema ou parte de um sistema desempenhar as suas funções adequadamente, durante o período de tempo previsto e sob as condições de operação encontradas.



3.1.1 - ESTADOS DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos de potência devem propiciar um serviço elétrico a um baixo custo operacional.

Com a ajuda de controles automáticos devem ajustar-se as variações de carga, de modo a minimizar os custos e coordenar a ação de vários centros de controle independentes.

Os objetivos do controle de um sistema elétrico estão relacionados ao nível de segurança no qual o mesmo está operando e, caso este nível caia a um determinado valor, medidas corretivas devem ser tomadas para recolocar o sistema num estado de operação robusto.

É fato raro um sistema elétrico ser prejudicado inteiramente por uma ocorrência catastrófica, sendo mais comum um nível reduzido de segurança torná-lo vulnerável.

Sendo planejados e projetados para operar tão eficientemente quanto possível debaixo de condições normais, no caso de perdas de equipamento, os sistemas devem absorver os problemas daí decorrentes sem maiores danos, encontrando um novo ponto de equilíbrio para o fluxo de energia.

Por outro lado, a coincidência de distúrbios e/ou falhas potenciais nos componentes podem se combinar, produzindo solicitações além daquelas previstas dentro dos limites econômicos disponíveis e levados em conta no seu planejamento.

Embora de um modo geral, certos fatores possam influir na vulnerabilidade de um sistema (localização geográfica, densidade populacional da área servida, grau de treinamento de operadores) parece haver fatores de predisposição para a interrupção no fornecimento de energia, a exemplo do que acontece com os seres humanos face às doenças [37].

Esta predisposição aumentaria a chance de determinados eventos levarem o sistema a derrocada ao invés de corretamente desencadear as operações de proteção que irão conter o distúrbio.

As condições de um sistema elétrico de potência podem ser descritas por cinco estados operativos conforme mostra a figura 3.

a) Estado operacional normal

A geração é adequada para suprir a demanda de carga e nenhum equipamento está sobrecarregado. Existe reserva suficiente para propiciar um nível de segurança.

b) Estado de alerta

Caso o nível de segurança caia abaixo de determinado limite ou cresça a probabilidade de distúrbio, o sistema entra em estado de alerta. Aqui todas as restrições ainda estão satisfeitas, mas as reservas existentes não impedirão a violação de algumas restrições (sobrecargas, por exemplo).

Ações preventivas devem ser desencadeadas para se voltar ao estado normal.

c) Estado de emergência

Caso um distúrbio suficientemente severo ocorra antes das ações preventivas citadas anteriormente, entrar-se-á no estado de emergência.

O sistema ainda estará intacto e medidas de emergência serão postas em prática ("medidas heróicas") de modo a colocá-lo pelo menos no estado de alerta.

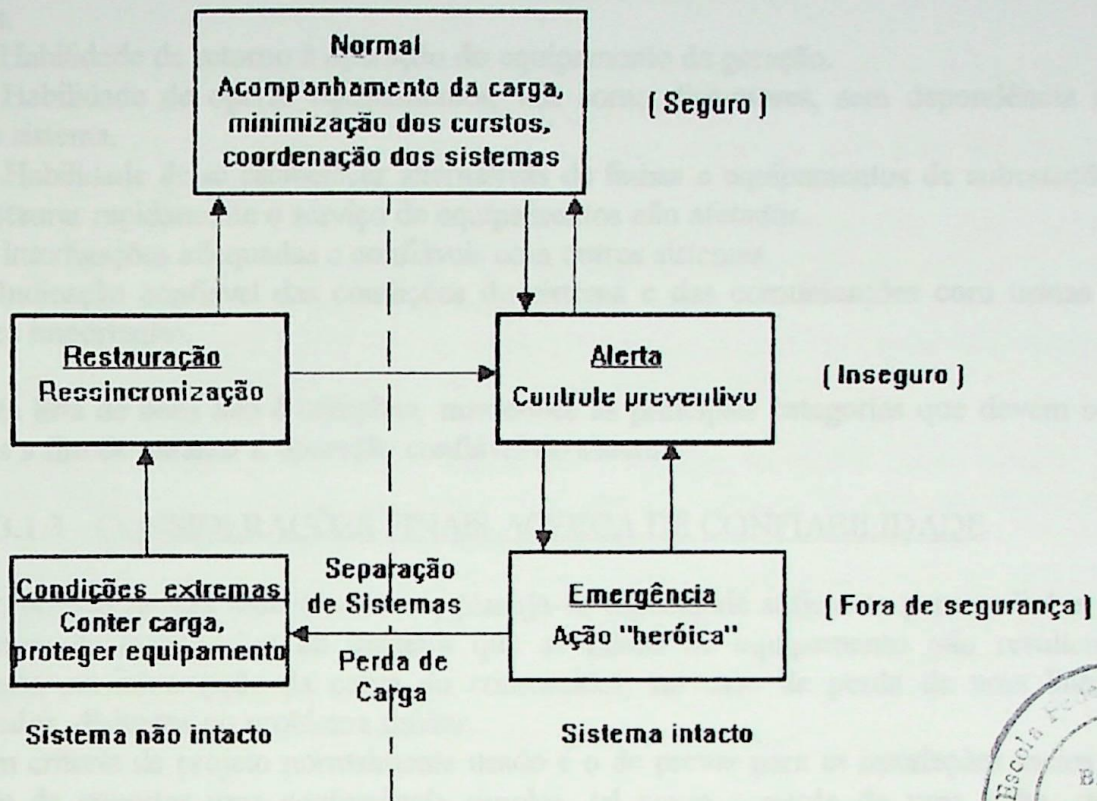
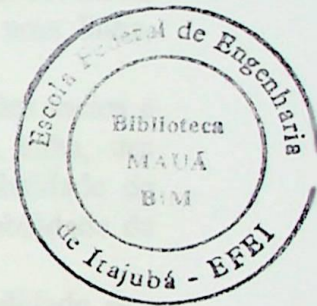


Figura 3 - Condições de um sistema elétrico de potência



d) Estado de condições extremas

Se estas medidas de emergência forem insuficientes ou não tomadas a tempo, ou ainda o distúrbio inicial (ou outro subsequente) conseguir solicitar demasiado o sistema, este começa a se desintegrar.

Neste estado, o sistema não está mais intacto, apenas porções do mesmo estão a salvo do desastre.

A estratégia aqui consiste em salvar o que for possível do colapso, protegendo a vida dos equipamentos.

c) Estado de restauração

Caso o colapso tenha sido detido e se houver algum equipamento remanescente em operação ou retornando a operação, poder-se-á entrar no estado de restauração com as ações de controle dirigidas para reconectar a carga perdida e recompor o sistema.

Convém ressaltar que estas perturbações e, por conseguinte, os respectivos efeitos não são totalmente independentes uns dos outros.

3.1.2 - FATORES QUE AFETAM A CONFIABILIDADE DE UM SISTEMA ELÉTRICO

Alguns dos principais fatores que afetam a confiabilidade de um sistema elétrico são:

- a) Capacidade de reserva.
- b) Adequada capacidade de transmissão e transformação.
- c) Habilidade de equilibrar carga e geração.



- d) Pronto desligamento das linhas e equipamentos afetados e recomposição das instalações.
- e) Habilidade de retorno à operação do equipamento de geração.
- f) Habilidade de operar equipamentos, tais como disjuntores, sem dependência da energia do sistema.
- g) Habilidade de se estabelecer alternativas de linhas e equipamentos de subestação, para se restaurar rapidamente o serviço de equipamentos não afetados.
- h) Interligações adequadas e confiáveis com outros sistemas.
- i) Indicação confiável das condições do sistema e das comunicações com usinas e subestações importantes.

Esta lista de itens não é completa, mas cobre as principais categorias que devem ser observadas a fim de garantir a operação confiável do sistema.

3.1.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS ACERCA DE CONFIABILIDADE

No projeto de um sistema elétrico, planeja-se capacidade suficiente para as linhas e equipamentos de subestações de maneira que as falhas de equipamento não resultem, normalmente, na interrupção da carga do consumidor, no caso de perda de uma linha, transformador, disjuntor ou problema similar.

Um critério de projeto normalmente usado é o de prever para as instalações meios e capacidade de suportar uma contingência simples, tal como a perda de uma linha, um transformador, ou outra possível ocorrência. No projeto, não se prevê a possibilidade de contingência múltipla devido ao custo excessivo de investimento e reduzida probabilidade de dois eventos ocorrerem simultaneamente.

Depois que um sistema elétrico é projetado e construído, é responsabilidade dos operadores operá-lo de modo que os limites de projeto não sejam ultrapassados como também estejam alerta para as condições que possam afetar a sua confiabilidade, além da prontidão para evitar que situações de perigo possam acontecer. Após um distúrbio com perda de serviço ou de indisponibilidade de equipamento, o operador deverá proceder a recomposição, a fim de que a confiabilidade seja mantida no seu mais elevado nível.

Um sistema construído para ser confiável não será afetado por distúrbios corriqueiros e evidenciará um grau razoável de segurança a maior parte do tempo. Ocasionalmente ele poderá passar por períodos de relativa insegurança e, caso não ocorram maiores problemas (distúrbios graves durante estes períodos), pode-se afirmar que o mesmo é confiável, embora às vezes, menos seguro.

Assim, o nível de segurança é determinado pelas relações entre suas margens de reserva (margem de reserva entre fluxos de carga nas linhas e as correspondentes capacidades de transmissão destas) e pela probabilidade de contingência.

Em nível de consumidor, a confiabilidade de um sistema elétrico pode ser medida a partir de dois índices básicos.

- a) FEC : Número de interrupções verificadas no período de um ano (frequência de interrupções).
- b) DEC : Duração média das interrupções citadas acima.



3.2 - FREQÜÊNCIA CONSTANTE

Existem pelo menos três boas razões pelas quais devem-se manter as flutuações de frequência de um sistema elétrico dentro de limites rigorosos.

1ª - A maioria dos tipos de motores de corrente alternada gira com velocidades diretamente relacionadas com a frequência.

2ª - É usado um grande número de relógios que operam eletricamente. Tais relógios são todos acionados por motores síncronos e sua exatidão é uma função não apenas do erro de frequência, mas realmente da integral (somatório) deste erro.

3ª - O funcionamento global de um sistema de potência pode ser mais efetivamente controlado mantendo-se o erro de frequência dentro de limites rigorosos.

A primeira das razões acima não impõe, em particular, restrições muito severas às flutuações de frequência. A maioria das cargas acionadas por motores de corrente alternada, não é sensível a flutuações de frequência da ordem de 2%.

As outras duas razões são as mais importantes. Variações incomuns na frequência são uma indicação de que há algo errado. Quando um sistema fica "doente", os indicadores de frequência funcionam como os termômetros clínicos funcionam para o corpo humano.

Normalmente a constância da frequência é mantida nos limites de $\pm 0,05$ [Hz].

O controle de frequência feito nas unidades geradoras possui três níveis:

1º - Regulação Primária: As unidades geradoras são dotadas de mecanismos de regulação automática de velocidade, que variam a potência gerada em função da frequência (aumentam a potência gerada com o decréscimo da frequência e vice-versa).

2º - Regulação Secundária: Também conhecido como Controle Automático de Geração (C.A.G.), garante desvios nulos de frequência ou desvios nulos de potência ativa de intercâmbio. Existe em três modalidades.

. Flat Frequency (FF) : Objetivo de desvio nulo de frequência.

. Flat Tie Line (FTL) : Objetivo de desvios nulos de potência ativa de intercâmbio.

. Tie Line Bias (TLB): Objetiva desvios nulos de frequência e potência de intercâmbio.

3º - Regulação terciária: Objetiva o despacho econômico das unidades geradoras (muito usado em sistemas com diversas gerações térmicas).

3.3 - TENSÃO CONSTANTE

Com relação a este item na análise da qualidade de energia elétrica entregue a um determinado consumidor, pode-se separá-la nos seguintes tópicos.

. Harmônicos de tensão.

. Quedas de tensão.

. Flutuação de tensão (flicker).

. Desequilíbrio.

O primeiro item, por envolver um dos objetivos desta dissertação, juntamente com o item fator de potência (que tem a ver com queda de tensão) serão discutidos mais adiante .



Assim neste item, serão analisados apenas de modo superficial os outros três problemas envolvendo a qualidade de tensão.

3.3.1 - QUEDAS DE TENSÃO

Praticamente todos os equipamentos usados num sistema elétrico de potência são projetados para funcionar num dado nível de tensão, a nominal. Se a tensão do sistema afastar-se deste valor, o desempenho desses equipamentos, bem como sua expectativa de vida, caem. Por exemplo, o conjugado de um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, o fluxo luminoso de uma lâmpada varia fortemente com a tensão.

Portanto são fortes os motivos para manter a tensão do sistema elétrico fixa, todavia não há a necessidade de controlá-la mantendo-a entre limites rigorosos, como no caso da frequência. Existem padrões industriais que fixam as variações toleráveis da tensão da rede em valores relativamente amplos.

Seja a análise do sistema mostrado na figura 4, envolvendo duas barras e uma linha de transmissão.

A carga $P + jQ$ é alimentada pela barra 2. Como não existe gerador nesta barra, a carga deve ser alimentada por meio da linha, a partir da barra 1.

Para a análise, adotam-se por conveniência, as seguintes hipóteses simplificadoras, todas perfeitamente razoáveis.

1ª - A tensão da barra V_1 é mantida com módulo constante, por meio do controle de campo de G_1 . Esta mesma tensão é escolhida como a de referência.

2ª - A impedância da linha é puramente indutiva, ou seja, $Z = j.X$.

3ª - A potência da linha é igual a $P + jQ$. Devido às perdas na reatância da linha, a potência reativa é um pouco maior no terminal correspondente ao gerador.

Assim, têm-se do circuito as seguintes relações:

$$V_2 = V_1 - I.Z$$

$$V_1 \cdot I^* \cong P + j.Q$$

Assim:

$$I^* \cong \frac{P - j.Q}{V_1}$$

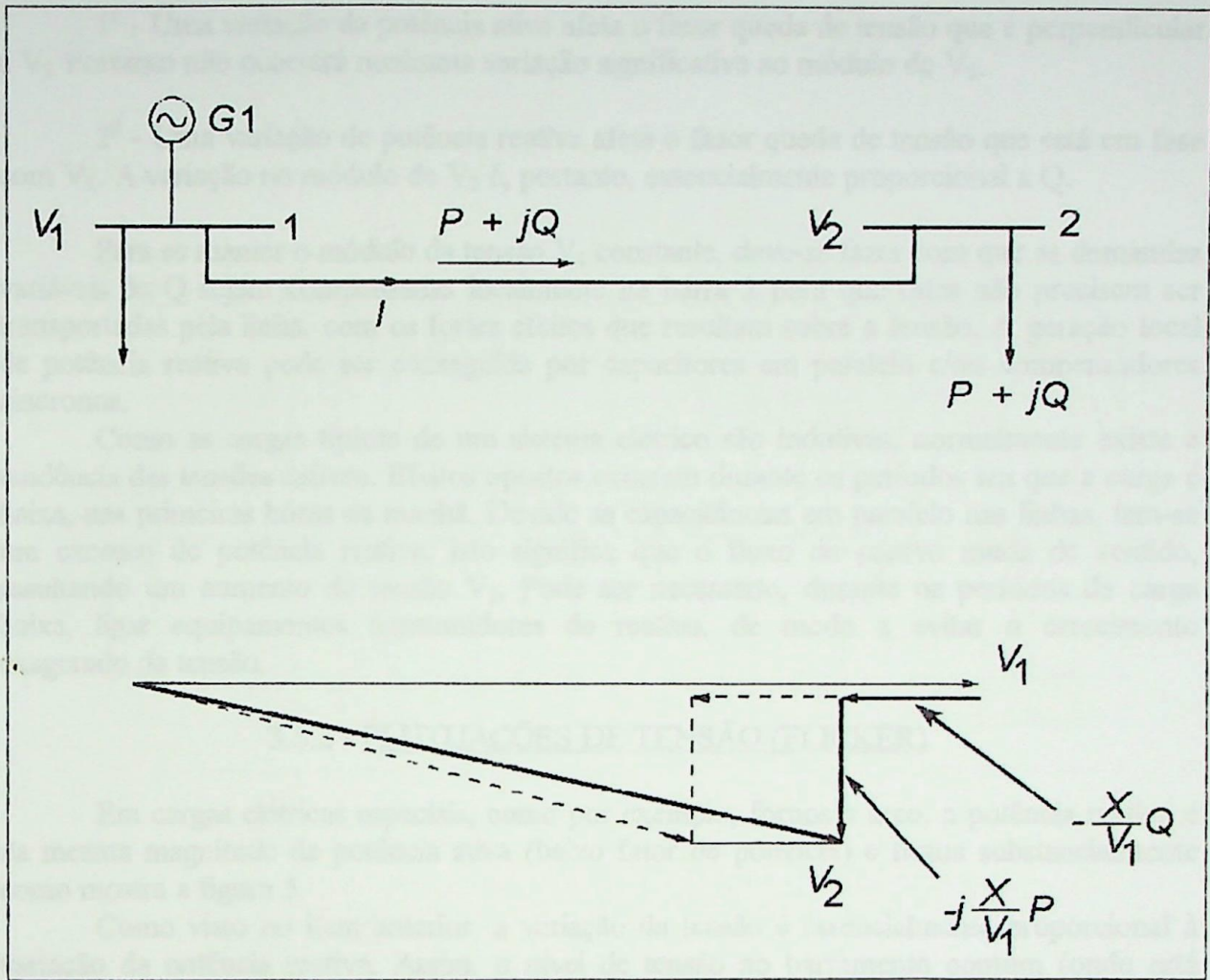


Figura 4 - Alteração da tensão em função da potência reativa.

Adotando-se a tensão V_1 como referência (ângulo de fase igual a zero graus), tem-se portanto:

$$V_2 = V_1 - j \cdot \frac{P - j \cdot Q}{V_1} \cdot X$$

$$V_2 = V_1 - \frac{X}{V_1} \cdot Q - j \cdot \frac{X}{V_1} \cdot P$$

Observação: Neste modelo simples, a linha pode estar “representando” outros componentes do sistema, como um transformador e uma linha de transmissão, etc., ou seja, pode estar representando o equivalente de Thevenin do sistema elétrico “visto” da barra 2.

Da última equação obtida, conclui-se que:



1º - Uma variação da potência ativa afeta o fasor queda de tensão que é perpendicular a V_1 . Portanto não ocorrerá nenhuma variação significativa ao módulo de V_2 .

2º - Uma variação de potência reativa afeta o fasor queda de tensão que está em fase com V_1 . A variação no módulo de V_2 é, portanto, essencialmente proporcional a Q .

Para se manter o módulo da tensão V_2 constante, deve-se fazer com que as demandas variáveis de Q sejam compensadas localmente na barra 2 para que estas não precisem ser transportadas pela linha, com os fortes efeitos que resultam sobre a tensão. A geração local de potência reativa pode ser conseguida por capacitores em paralelo e/ou compensadores síncronos.

Como as cargas típicas de um sistema elétrico são indutivas, normalmente existe a tendência das tensões caírem. Efeitos opostos ocorrem durante os períodos em que a carga é baixa, nas primeiras horas da manhã. Devido as capacitâncias em paralelo nas linhas, tem-se um excesso de potência reativa. Isto significa que o fluxo de reativo muda de sentido, resultando um aumento de tensão V_2 . Pode ser necessário, durante os períodos de carga baixa, ligar equipamentos consumidores de reativo, de modo a evitar o crescimento exagerado da tensão.

3.3.2 - FLUTUAÇÕES DE TENSÃO (FLICKER)

Em cargas elétricas especiais, como por exemplo, fornos a arco, a potência reativa é da mesma magnitude da potência ativa (baixo fator de potência) e flutua substancialmente como mostra a figura 5.

Como visto no item anterior, a variação da tensão é essencialmente proporcional à variação da potência reativa. Assim, o nível de tensão no barramento comum (onde está conectado a carga especial e outros consumidores) terá o mesmo comportamento da figura citada anteriormente.

Dependendo da frequência de oscilação da tensão, esta é perceptível pelo olho humano, em lâmpadas incandescentes, como mostra a figura 6.

O ponto A do gráfico significa que uma oscilação de tensão de 0,8% com frequência de 8 [Hz] é perceptível ao olho humano para lâmpadas de 100[W], 75[W], 60 [W] e 40 [W] a 225 [Volts]. O ponto B significa que basta uma oscilação a 9 [Hz] numa lâmpada de 40 [W] e 125 [V] ser de 1% para ser perceptível ao olho humano.

Os diversos equipamentos existentes para a estabilização da tensão são os compensadores síncronos e os compensadores estáticos. Pelo fato de os compensadores síncronos serem caros e lentos, para a compensação de reativos de fornos a arco são usados os compensadores estáticos.

3.3.3 - DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES

Muitas cargas dos sistemas elétricos de potência são assimétricas, como por exemplo, forno a arco e locomotivas elétricas.

Este desequilíbrio gera correntes desequilibradas, que acabam por resultar em desequilíbrio de tensão em outros pontos do sistema.

Uma maneira bastante simples de se corrigir desequilíbrio deste tipo é através da instalação de elementos puramente reativos em paralelo com a carga em cada fase.

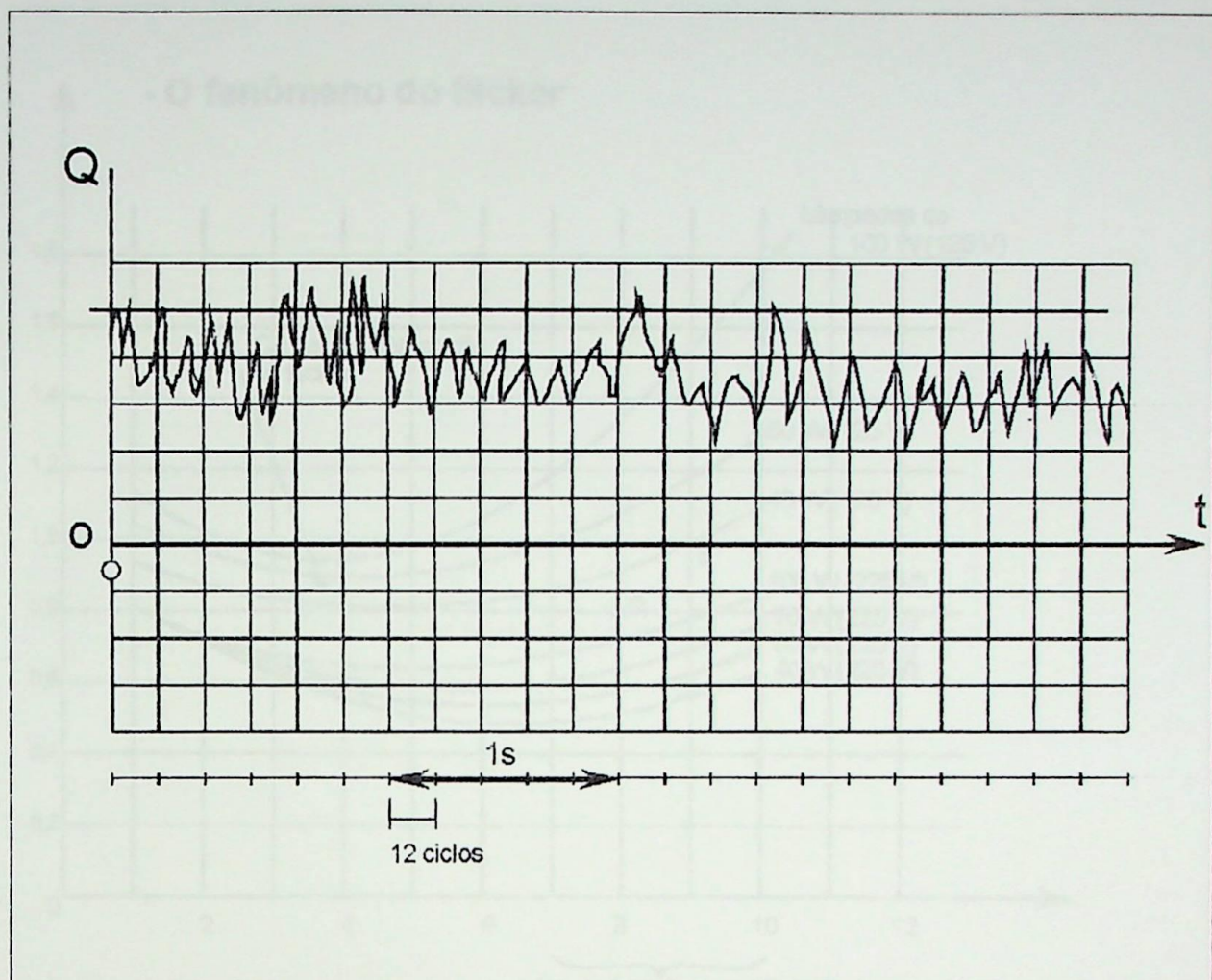


Figura 5 - Flutuação típica do reativo em um forno a arco

Assim, seja a carga desequilibrada, mostrada na figura 7.

Para se equilibrar esta carga, usa-se a tabela 1.

Potências de compensação reativas resultantes	Potências reativas para correção do fator de potência e balanceamento de carga.		
	P_1, Q_1 (AB)	P_2, Q_2 (BC)	P_3, Q_3 (AC)
$Q_{AB} =$	Q_1	$-P_2/\sqrt{3}$	$P_3/\sqrt{3}$
$Q_{BC} =$	$P_1/\sqrt{3}$	Q_2	$-P_3/\sqrt{3}$
$Q_{CA} =$	$-P_1/\sqrt{3}$	$P_2/\sqrt{3}$	Q_3

Tabela 1 - Potências reativas para balanceamento de carga.

OBS.: Na tabela o sinal negativo indica uma indutância.

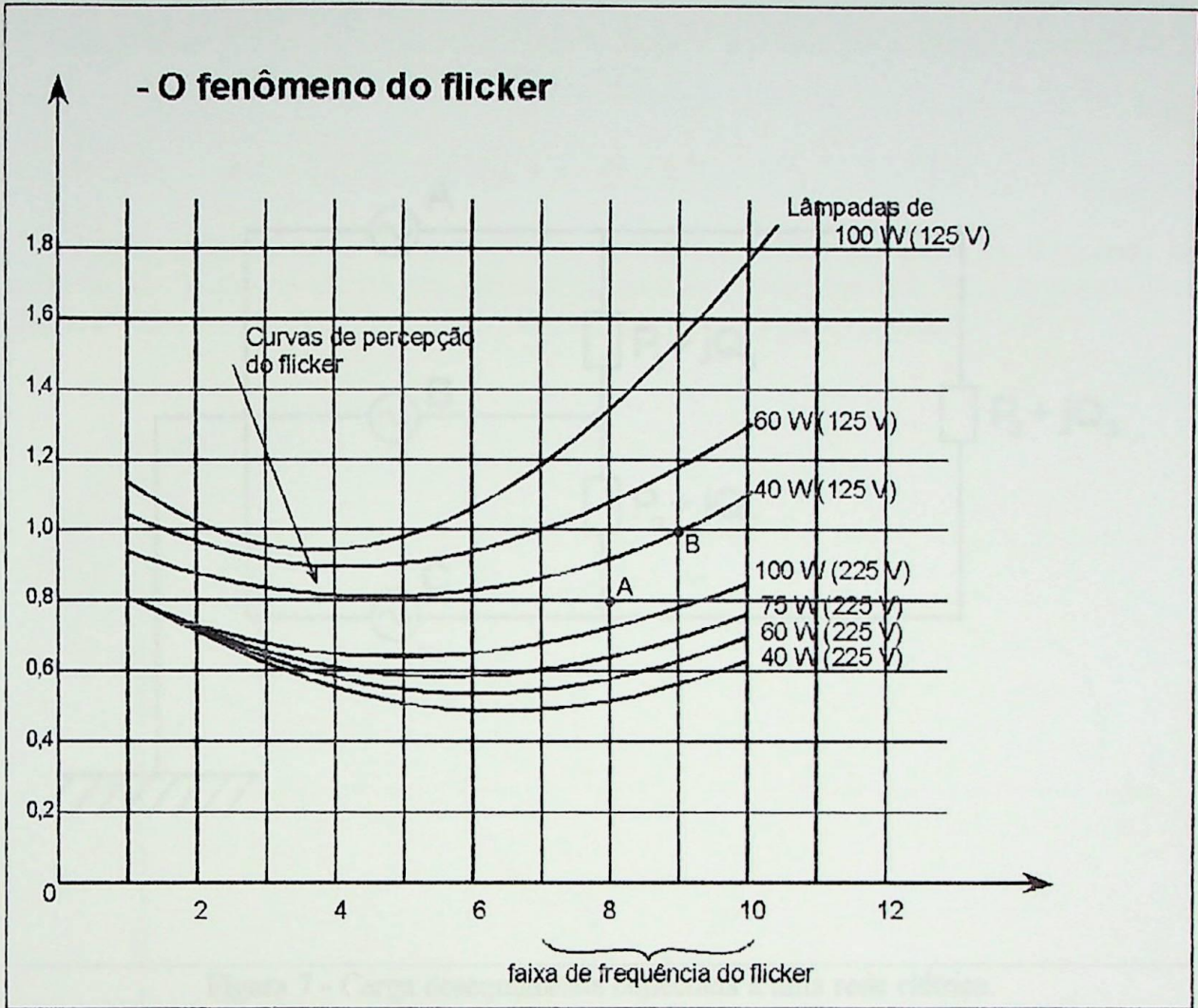


Figura 6 - Variação da tensão em função da frequência para lâmpadas incandescentes

Para se saber qual a potência reativa a se instalar, por exemplo, entre as fases A e B (Potência Q_{AB}), basta que se some a linha correspondente a esta potência ($Q_1, -P_2/\sqrt{3}$ e $P_3/\sqrt{3}$) onde o sinal “+” indica potência reativa de característica capacitiva e o sinal “-” indica potência reativa de característica indutiva.

Por exemplo, sejam os valores das potências para o sistema representado pela figura 7.

$$P_1 + jQ_1 = 10 + j.5 \text{ [MVA]}$$

$$P_2 + jQ_2 = 8 + j.6 \text{ [MVA]}$$

$$P_3 + j.Q_3 = 4 + j.9 \text{ [MVA]}$$

Então, de acordo com a tabela 1, a potência reativa a se instalar entre as fases A e B será:

$$Q_{AB} = Q_1 + (-P_2/\sqrt{3}) + P_3/\sqrt{3}$$

$$= 5 + (-8/\sqrt{3}) + 4/\sqrt{3}$$

$$Q_{AB} = 2,69 \text{ [MVar]}$$

→ Potência de natureza capacitiva (pois o sinal resultante foi positivo).

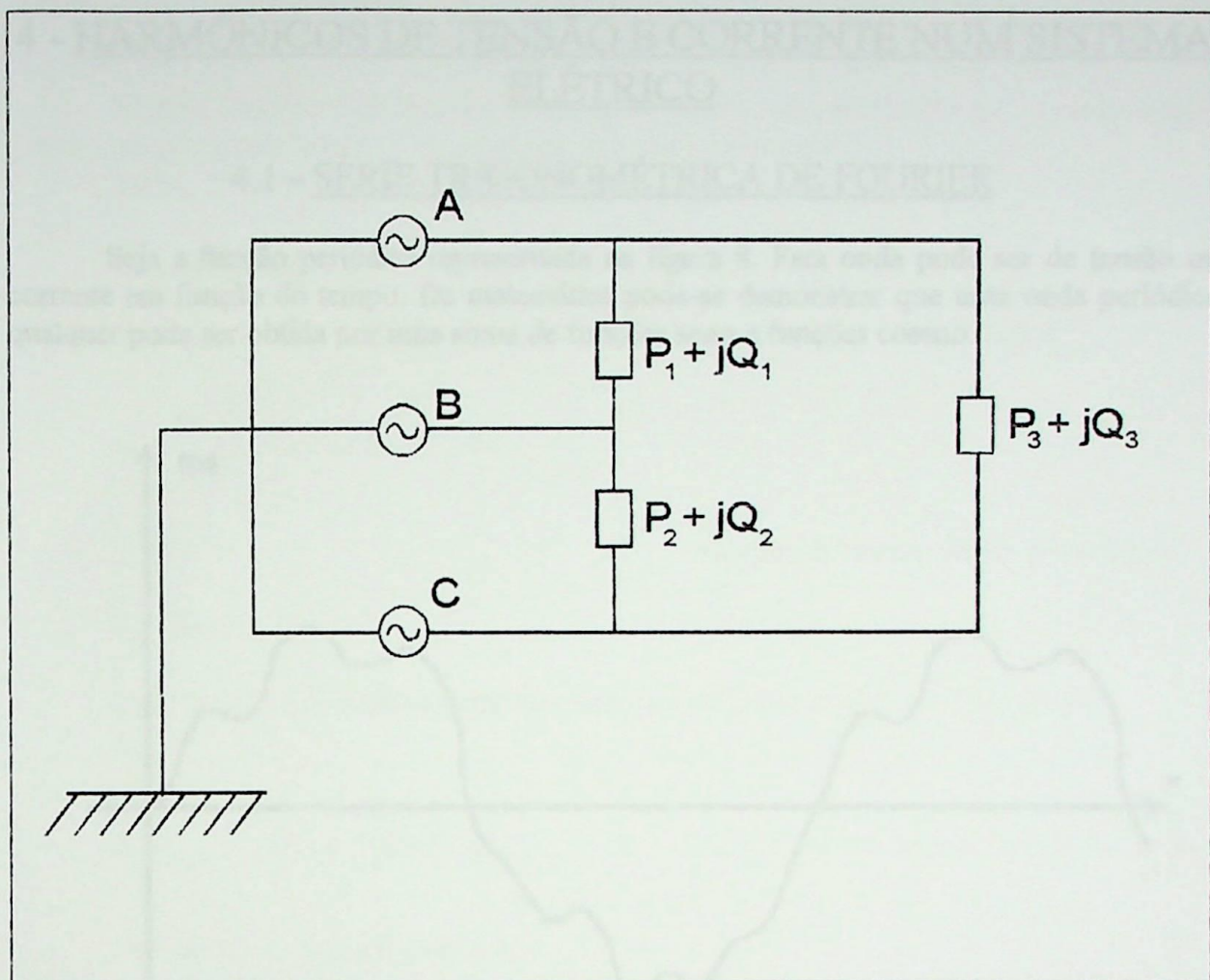


Figura 7 - Carga desequilibrada conectada a uma rede elétrica.

Da mesma forma, tem-se:

$$Q_{BC} = 9,464 \text{ [MVar]} \quad (\text{capacitivo})$$

$$Q_{CA} = 7,845 \text{ [MVar]} \quad (\text{capacitivo})$$

Pode-se usar também este método para compensar cargas monofásicas ou bifásicas. Basta considerar a fase (ou as fases, no caso monofásico) sem carga, como sendo de $P=Q=0$ e pode-se então usar a tabela dada da mesma forma.

Não é normal utilizar este tipo de compensação para sistema solidamente aterrado.

A aplicação principal é em siderúrgica, para forno a arco.



4 - HARMÔNICOS DE TENSÃO E CORRENTE NUM SISTEMA ELÉTRICO

4.1 - SÉRIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER

Seja a função periódica representada na figura 8. Esta onda pode ser de tensão ou corrente em função do tempo. Da matemática pode-se demonstrar que uma onda periódica qualquer pode ser obtida por uma soma de funções seno e funções coseno.

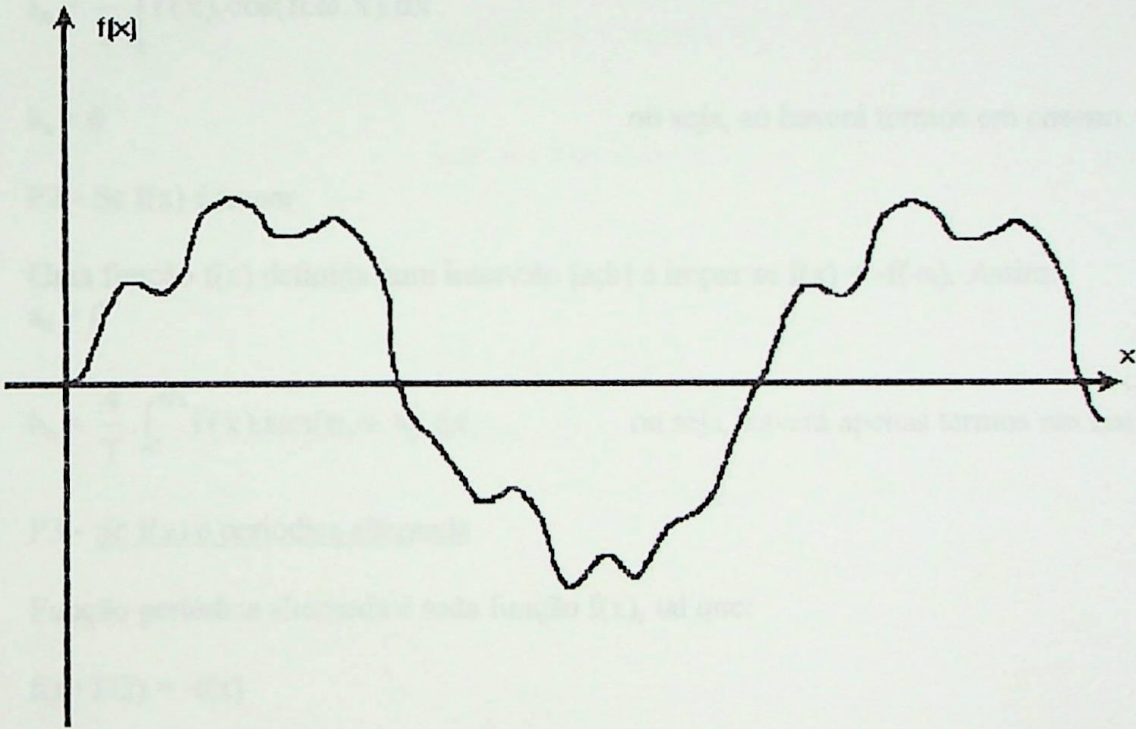


Figura 8 - Forma de onda periódica não senoidal

Assim, tem-se:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n\omega x + b_n \cdot \text{sen } n\omega x) \quad (\text{série trigonométrica de Fourier})$$

onde:

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_d^{d+T} f(x) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot x) dx \quad (\text{Coeficientes dos cosenos})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_d^{d+T} f(x) \cdot \text{sen}(n \cdot \omega \cdot x) dx \quad (\text{Coeficientes dos senos})$$

T - período da onda.

$\omega = 2 \cdot \pi / T$ - frequência angular da onda.



4.1.1 - PROPRIEDADES DA SÉRIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER

Se uma função $y = f(x)$ é periódica, pode-se torná-la uma função par ou uma função ímpar, apenas trasladando de maneira conveniente os eixos x e y .

Assim, pode-se usar as seguintes propriedades.

P1 - Se $f(x)$ é par

Uma função $f(x)$ definida num intervalo $[a;b]$ é par se $f(x) = f(-x)$. Assim:

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(x) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot x) \cdot dx :$$

$$b_n = 0$$

ou seja, só haverá termos em coseno.

P2 - Se $f(x)$ é ímpar

Uma função $f(x)$ definida num intervalo $[a;b]$ é ímpar se $f(x) = -f(-x)$. Assim:

$$a_n = 0$$

$$b_n = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} f(x) \cdot \text{sen}(n \cdot \omega \cdot x) \cdot dx$$

ou seja, haverá apenas termos em seno.

P3 - Se $f(x)$ é periódica alternada

Função periódica alternada é toda função $f(x)$, tal que:

$$f(x + T/2) = -f(x)$$

Neste caso:

$$a_{2n} = b_{2n} = 0$$

$$a_{2n-1} = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} f(x) \cdot \cos(2 \cdot n - 1) \cdot \omega \cdot x \cdot dx$$

$$b_{2n-1} = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} f(x) \cdot \text{sen}(2 \cdot n - 1) \cdot \omega \cdot x \cdot dx$$

ou seja, só haverá neste caso, coeficientes de ordem ímpar.

4.1.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A SÉRIE TRIGONOMÉTRICA DE FOURIER

1ª - Se $f(x)$ for não periódica definida no intervalo $[a,b]$, a série trigonométrica de Fourier convergirá para $f(x)$ em $[a,b]$ e para a sua extensão periódica fora deste intervalo.



2ª - A série representativa da função $f(x)$

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n\omega x + b_n \cdot \sin n\omega x)$$

pode ser escrita também da seguinte forma:

$$f(x) = C_0 + \sum_{n=1}^m C_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot x - \psi_n)$$

onde $C_0 = a_0/2$ valor médio da função $f(x)$

$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ módulo dos harmônicos

$\psi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$ fase dos harmônicos

Onde o gráfico de C_n em função de $n \cdot \omega$ é chamado espectro de frequências.

4.1.3 - EXEMPLOS

a) Seja a função representada na figura 9:

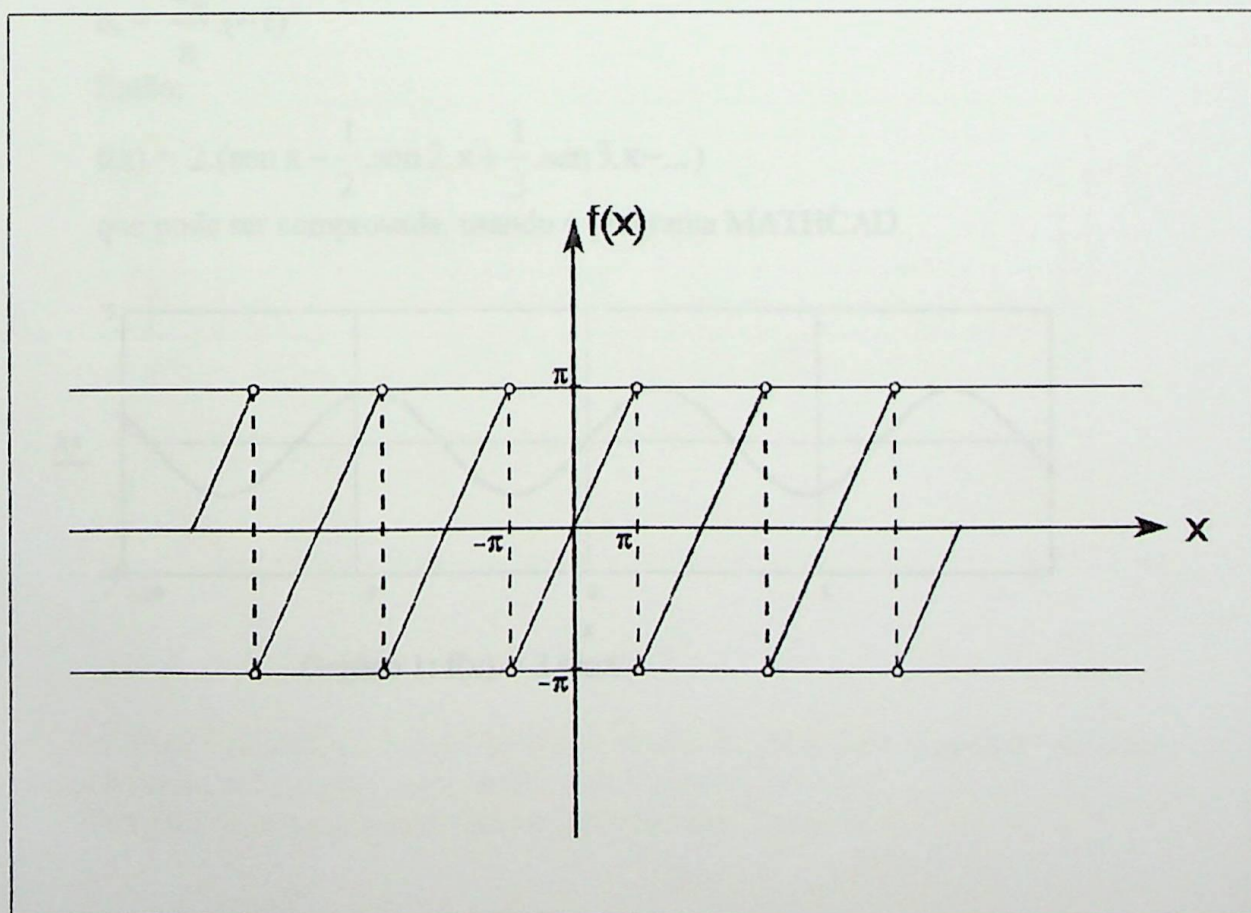


Figura 9 - Função a ser decomposta em série trigonométrica de Fourier.



O par de eixos foram escolhidos de modo que esta função fosse ímpar. Assim, da propriedade P₂, sabe-se que a série trigonométrica de Fourier somente terá termos em seno.

Assim:

$$a_n = 0$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(x) \cdot \text{sen}(n \cdot \omega \cdot x) \cdot dx$$

Sendo o período T da onda = 2π , por consequência $\omega = 2\pi/T = 1$, tem-se:

$$b_n = \frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cdot \text{sen}(n \cdot x) \cdot dx$$

$$b_n = \frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi} x \cdot \text{sen}(n \cdot x) \cdot dx$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \cdot \left[-x \cdot \frac{\cos(n \cdot x)}{n} + \frac{1}{n^2} \cdot \text{sen}(n \cdot x) \right]_0^{\pi}$$

$$b_n = \frac{-2}{n} \cdot (-1)^n$$

Então:

$$f(x) = 2 \cdot \left(\text{sen } x - \frac{1}{2} \cdot \text{sen } 2 \cdot x + \frac{1}{3} \cdot \text{sen } 3 \cdot x - \dots \right)$$

que pode ser comprovada, usando o programa MATHCAD.

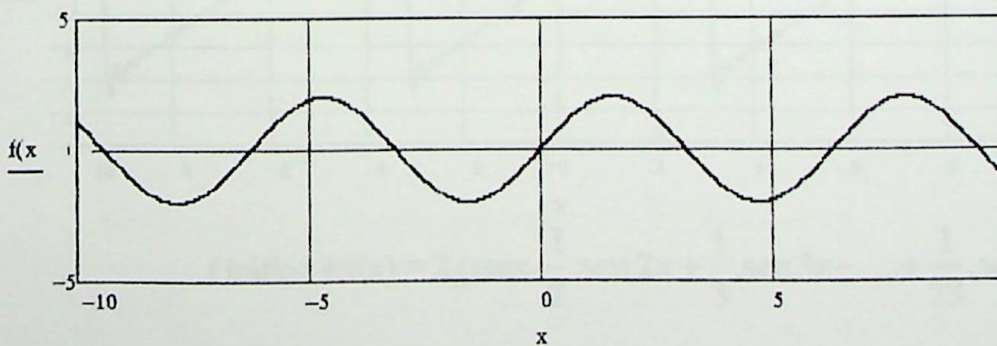


Gráfico 1: $f(x) = 2 \cdot \text{sen}x$

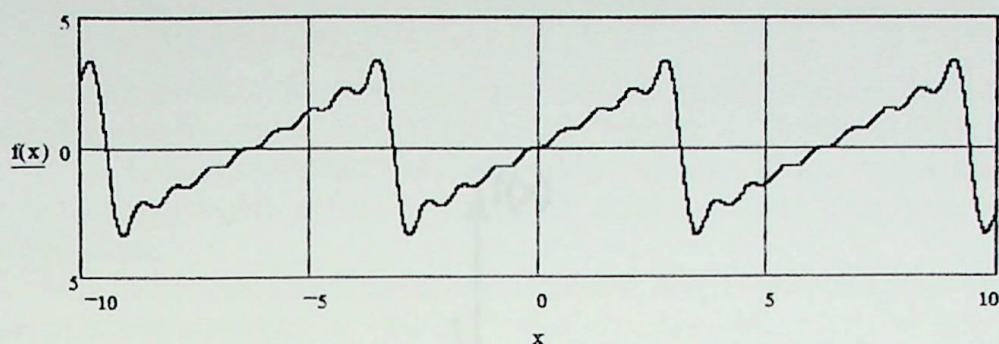


Gráfico 2: $f(x) = 2 \cdot (\text{sen}x - \frac{1}{2} \cdot \text{sen} 2x + \dots + \frac{1}{8} \cdot \text{sen} 8x)$

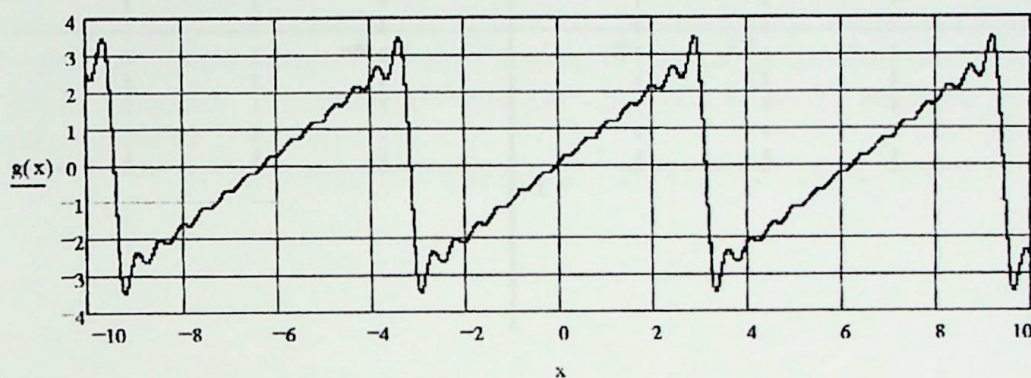


Gráfico 3: $f(x) = 2 \cdot (\text{sen}x - \frac{1}{2} \cdot \text{sen} 2x + \frac{1}{3} \cdot \text{sen} 3x - \dots + \frac{1}{13} \cdot \text{sen} 13x)$

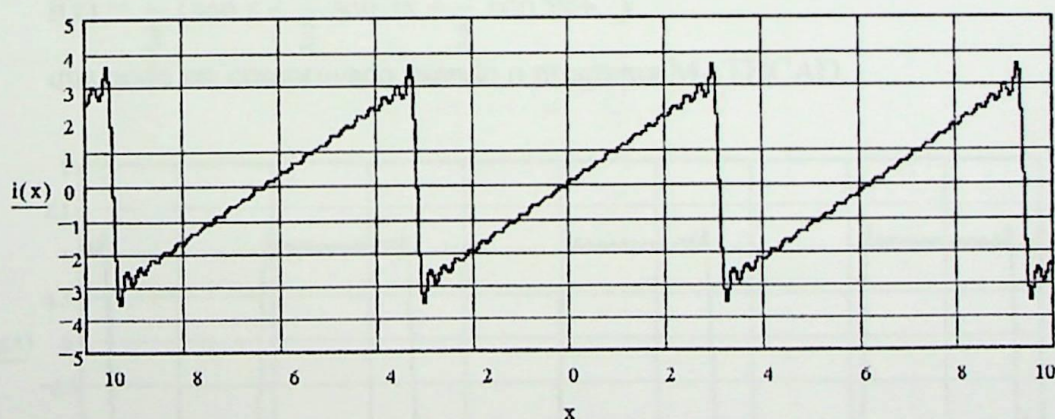


Gráfico 4: $f(x) = 2 \cdot (\text{sen}x - \frac{1}{2} \cdot \text{sen} 2x + \frac{1}{3} \cdot \text{sen} 3x - \dots + \frac{1}{23} \cdot \text{sen}(23x))$

b) Seja a função representada pela figura 10:

A função mostrada é ímpar e periódica alternada, então haverá apenas os termos ímpares e “em seno” na série trigonométrica de Fourier.

Fazendo da mesma maneira do exemplo anterior, chega-se a:

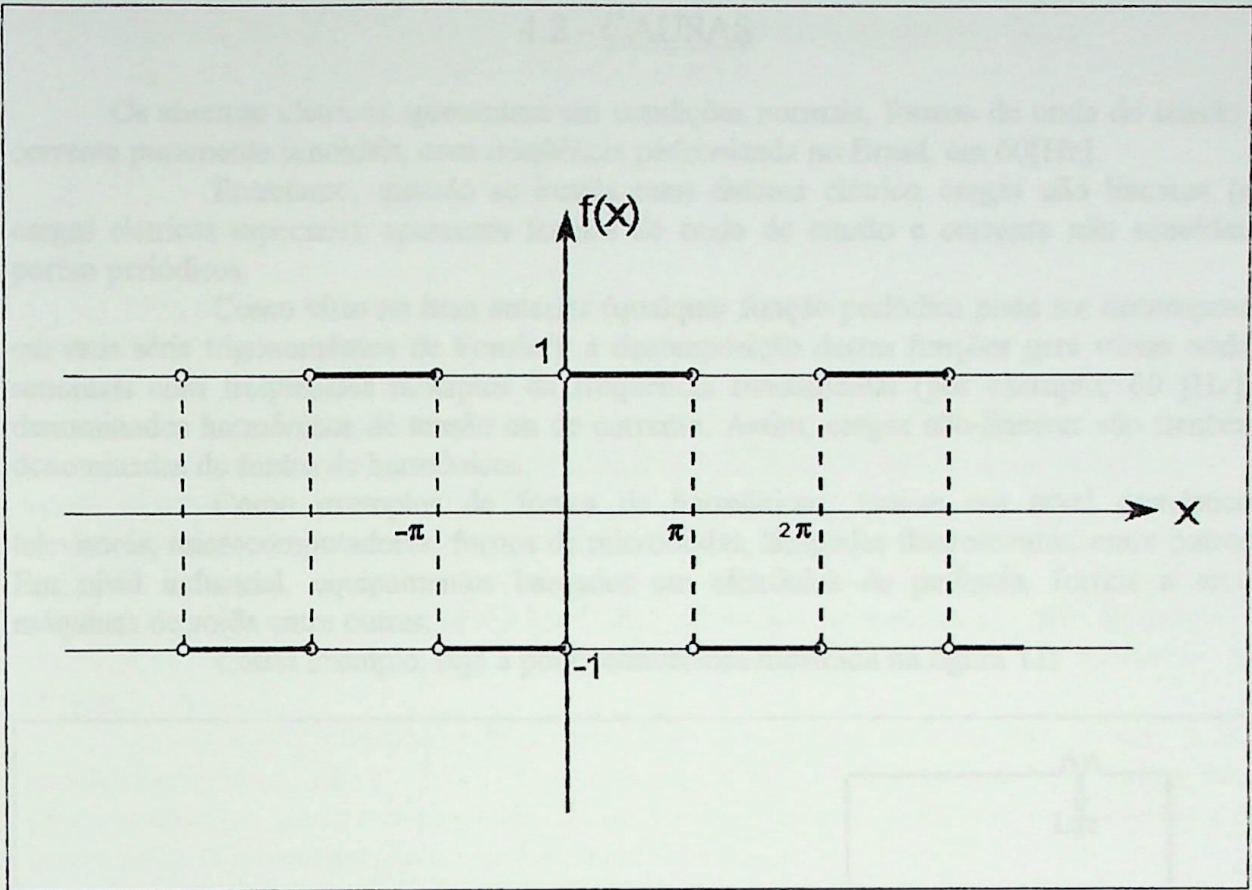
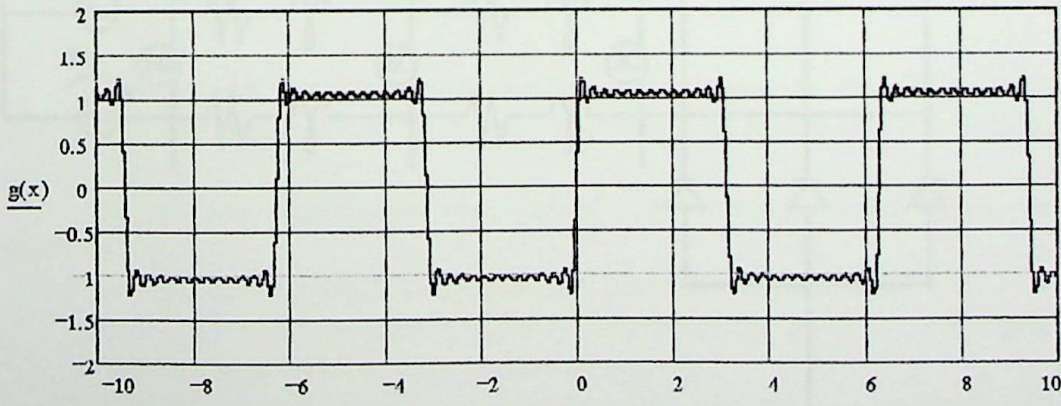


Figura 10 - Função a ser decomposta em série trigonométrica de Fourier.

$$f(x) = \frac{4}{3} \cdot (\text{sen } x + \frac{1}{3} \cdot \text{sen } 3x + \frac{1}{5} \cdot \text{sen } 5x + \dots)$$

que pode ser comprovado usando o programa MATHCAD.



$$\text{Gráfico 5 : } f(x) = \frac{4}{3} \cdot (\text{sen } x + \frac{1}{3} \cdot \text{sen } 3x + \frac{1}{5} \cdot \text{sen } 5x + \dots + \frac{1}{25} \cdot \text{sen } 25 \cdot x)$$



4.2 - CAUSAS

Os sistemas elétricos apresentam em condições normais, formas de onda de tensão e corrente puramente senoidais, com frequência padronizada no Brasil, em 60[Hz].

Entretanto, quando se instala num sistema elétrico cargas não lineares (as cargas elétricas especiais), aparecem formas de onda de tensão e corrente não senoidais, porém periódicas.

Como visto no item anterior (qualquer função periódica pode ser decomposta em uma série trigonométrica de Fourier), a decomposição destas funções gera várias ondas senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental (por exemplo, 60 [Hz]), denominados harmônicos de tensão ou de corrente. Assim, cargas não-lineares são também denominadas de fontes de harmônicos.

Como exemplos de fontes de harmônicos, tem-se em nível doméstico, televisores, microcomputadores, fornos de microondas, lâmpadas fluorescentes, entre outros. Em nível industrial, equipamentos baseados em eletrônica de potência, fornos a arco, máquinas de solda entre outras.

Como exemplo, seja a ponte conversora mostrada na figura 11:

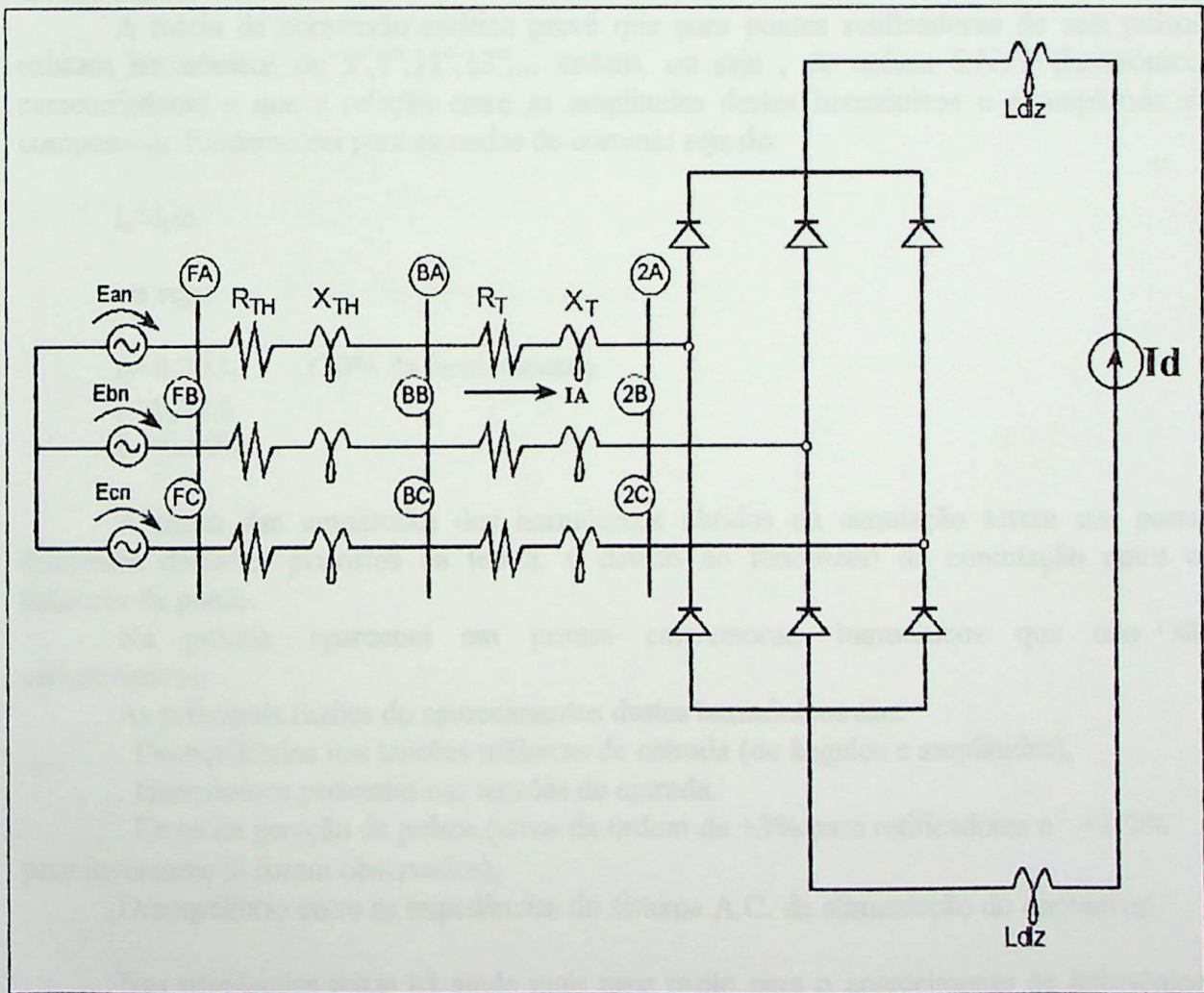


Figura 11 - Ponte Conversora com $\alpha = 0^\circ$

Onde:

$R_{TH} = 0,0118 [\Omega]$: Resistência equivalente de Thevenin do sistema elétrico



$X_{TH} = 0,317 [\Omega]$: Reatância equivalente de Thevenin do sistema elétrico

$X_T = 0,6345 [\Omega]$: Reatância do transformador

$L_d = 200[mH]$: Indutância de alisamento

$E_{m} = E_{bn} = E_{cn} = 7967,4 [\text{Volts}]$: Tensão de fase

$E_{ab} = E_{bc} = E_{ca} = 13800 [\text{Volts}]$: Tensão de linha

$I_d = 600 [A]$: Corrente de carga

Para estudo de harmônicos, qualquer componente do sistema pode ser representado por combinação de resistências, capacitâncias e indutâncias.

Por isto o transformador, neste caso, foi representado por uma resistência em série com uma indutância. Os valores acima estão referidos ao nível de 13800 [V].

Simulando-se este sistema no programa MICROTRAN, têm-se como resultado, as curvas mostradas nas figuras 12 a 15.

Pode-se fazer a decomposição destas ondas em série trigonométrica de Fourier, utilizando-se o mesmo procedimento descrito no item anterior. Porém, de um modo mais prático, pode-se usar o programa HARMONIC, que utiliza os arquivos de saída da simulação do programa MICROTRAN para fazer esta decomposição. O resultados são mostrados nas tabelas 2 a 5.

A teoria de conversão estática prevê que para pontes retificadoras de seis pulsos, existam harmônicos de $5^\circ, 7^\circ, 11^\circ, 13^\circ, \dots$ ordens, ou seja, de ordem $6.N \pm 1$ (harmônicos característicos) e que a relação entre as amplitudes destes harmônicos e a amplitude da componente fundamental para as ondas de corrente seja de:

$$I_n = I_1/n$$

ou seja:

$$I_5 = 0,20 \cdot I_1 \quad (20\% \text{ da fundamental})$$

$$I_7 = 0,14 \cdot I_1$$

$$I_{11} = 0,09 I_1$$

A razão das amplitudes dos harmônicos obtidos da simulação serem um pouco diferentes daqueles previstos na teoria, é devido ao fenômeno da comutação entre os tiristores da ponte.

Na prática, aparecem em pontes conversoras, harmônicos que não são característicos.

As principais razões do aparecimentos destes harmônicos são:

- . Desequilíbrios nas tensões trifásicas de entrada (de ângulos e amplitudes),
- . Harmônicos presentes nas tensões de entrada.
- . Erros da geração de pulsos (erros da ordem de +3% para retificadores e +1,5% para inversores já foram observados),
- . Desequilíbrio entre as impedâncias do sistema A.C. de alimentação do conversor.

Nas simulações feitas há ainda mais uma razão para o aparecimento de harmônicos (vide tabela 2, que é a decomposição em série trigonométrica de Fourier para uma onda senoidal), que são os próprios erros de arredondamento propagados dentro do programa HARMONIC.

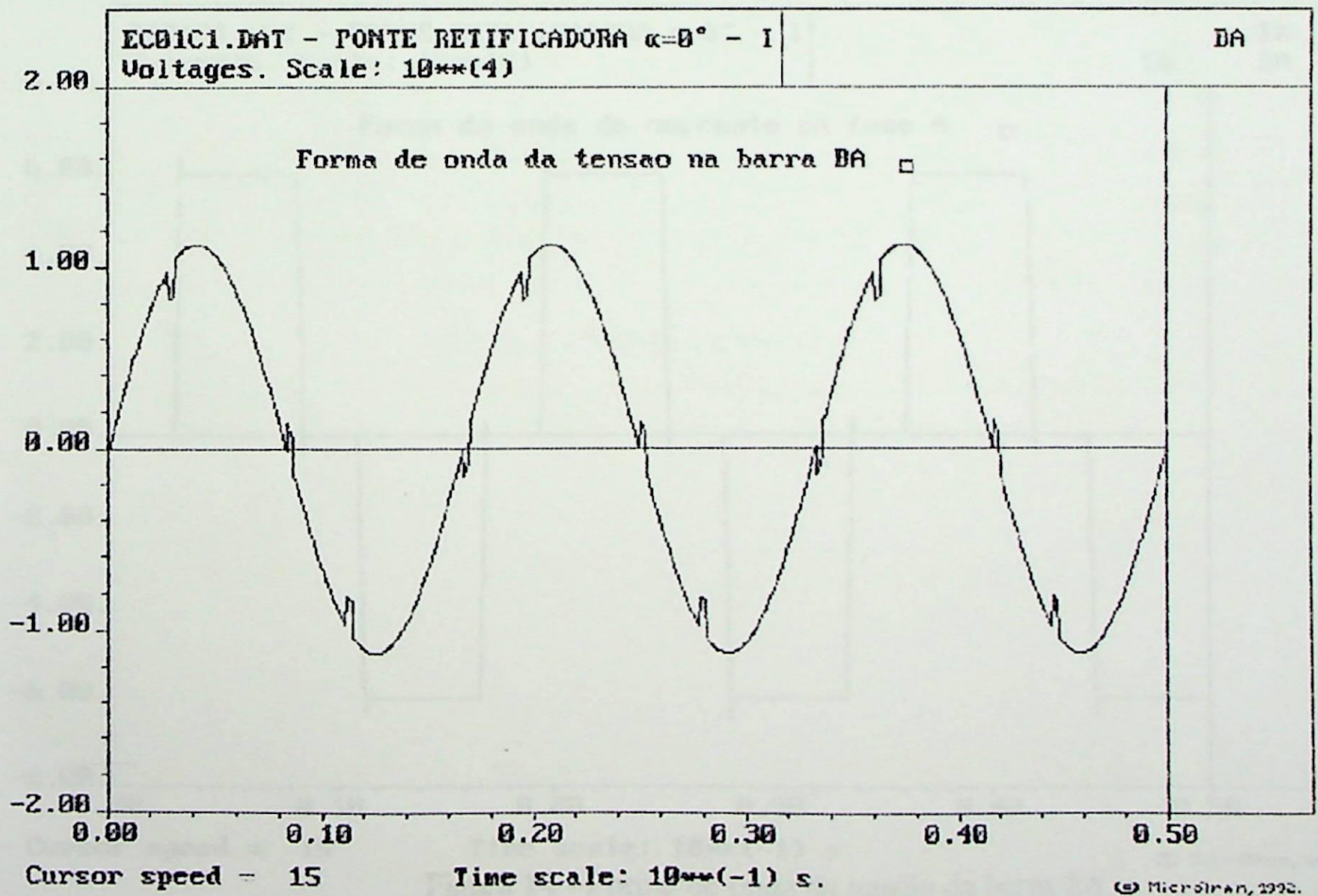
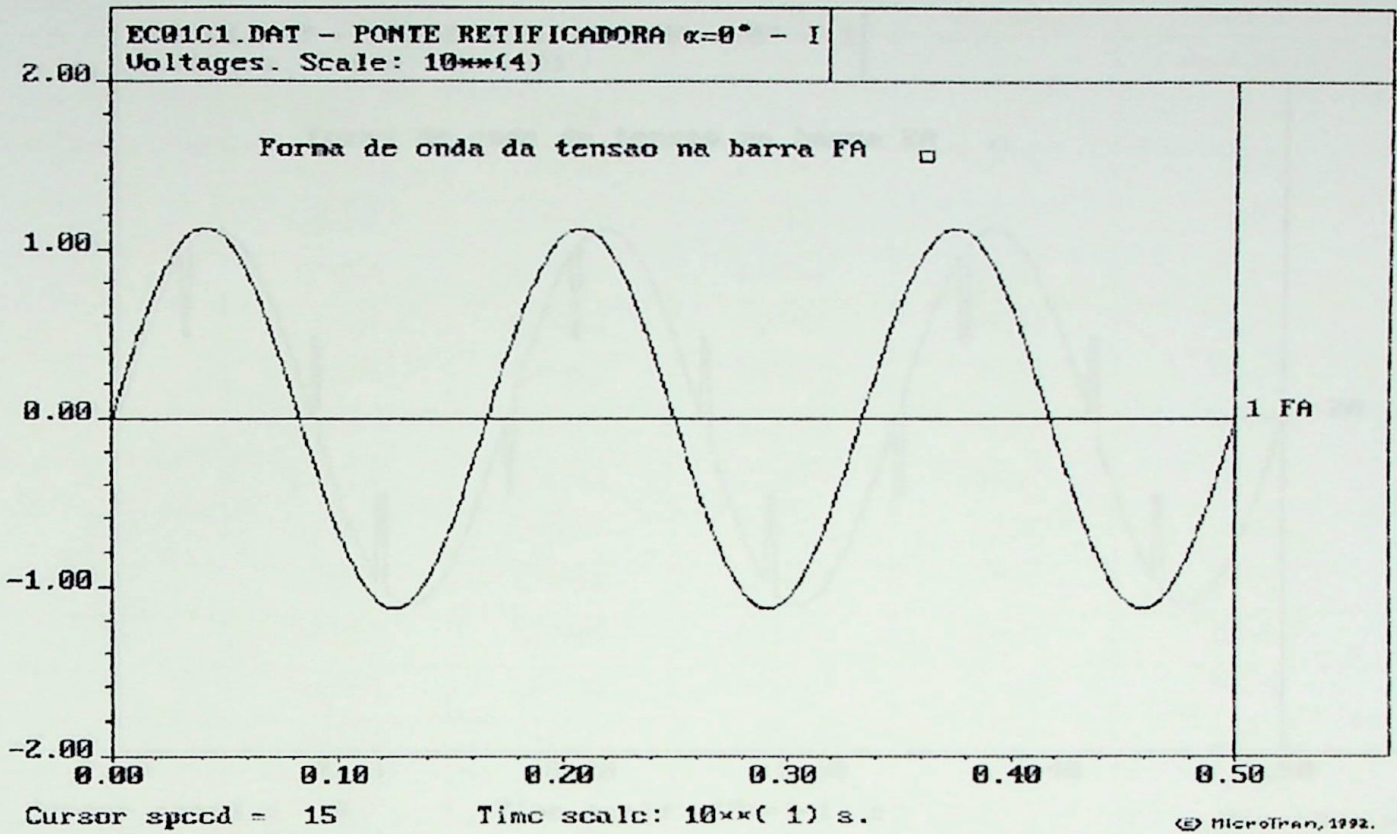


Figura 12 - Forma de onda da tensão na barra FA

Figura 13 - Forma de onda da tensão na Barra BA

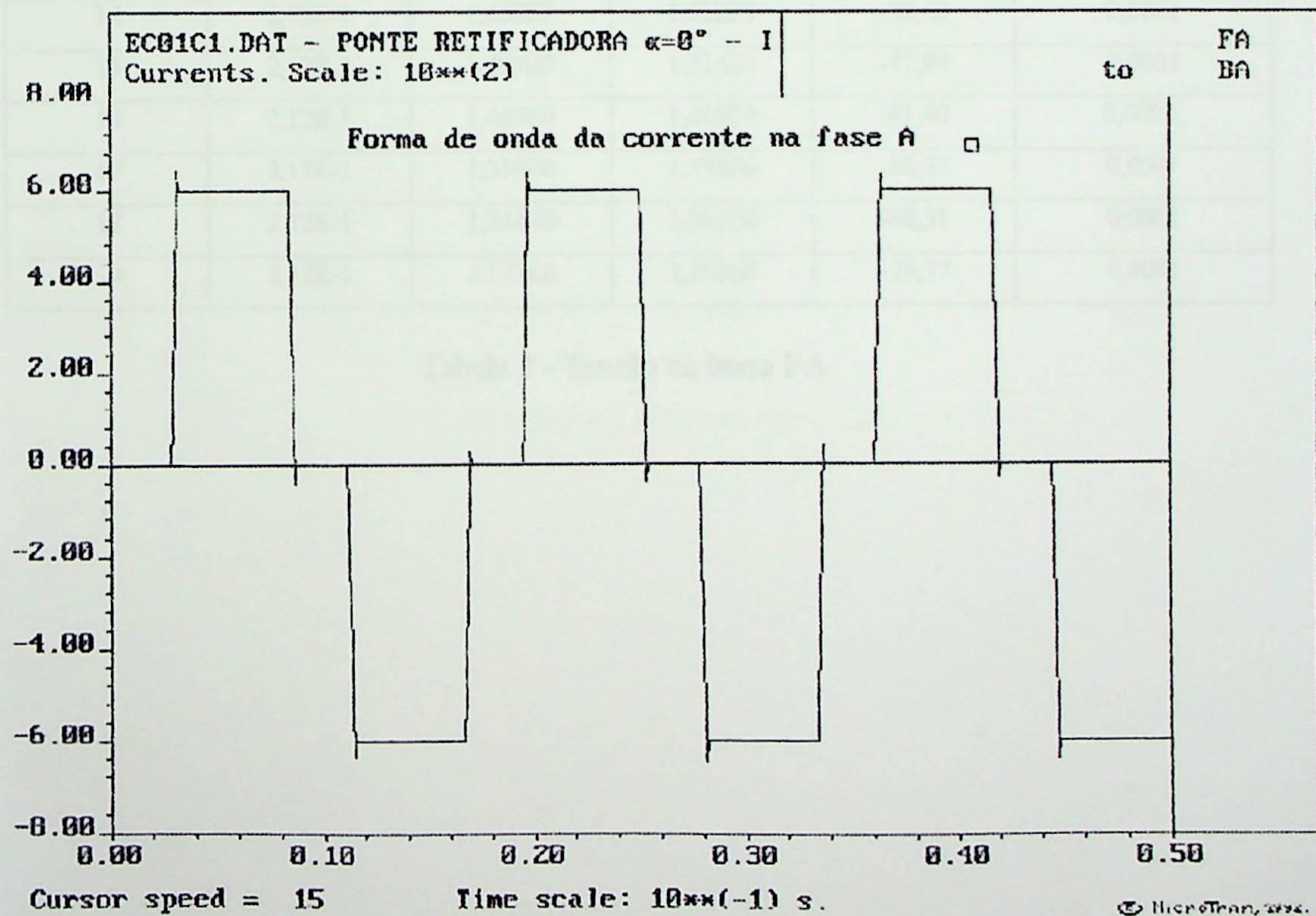
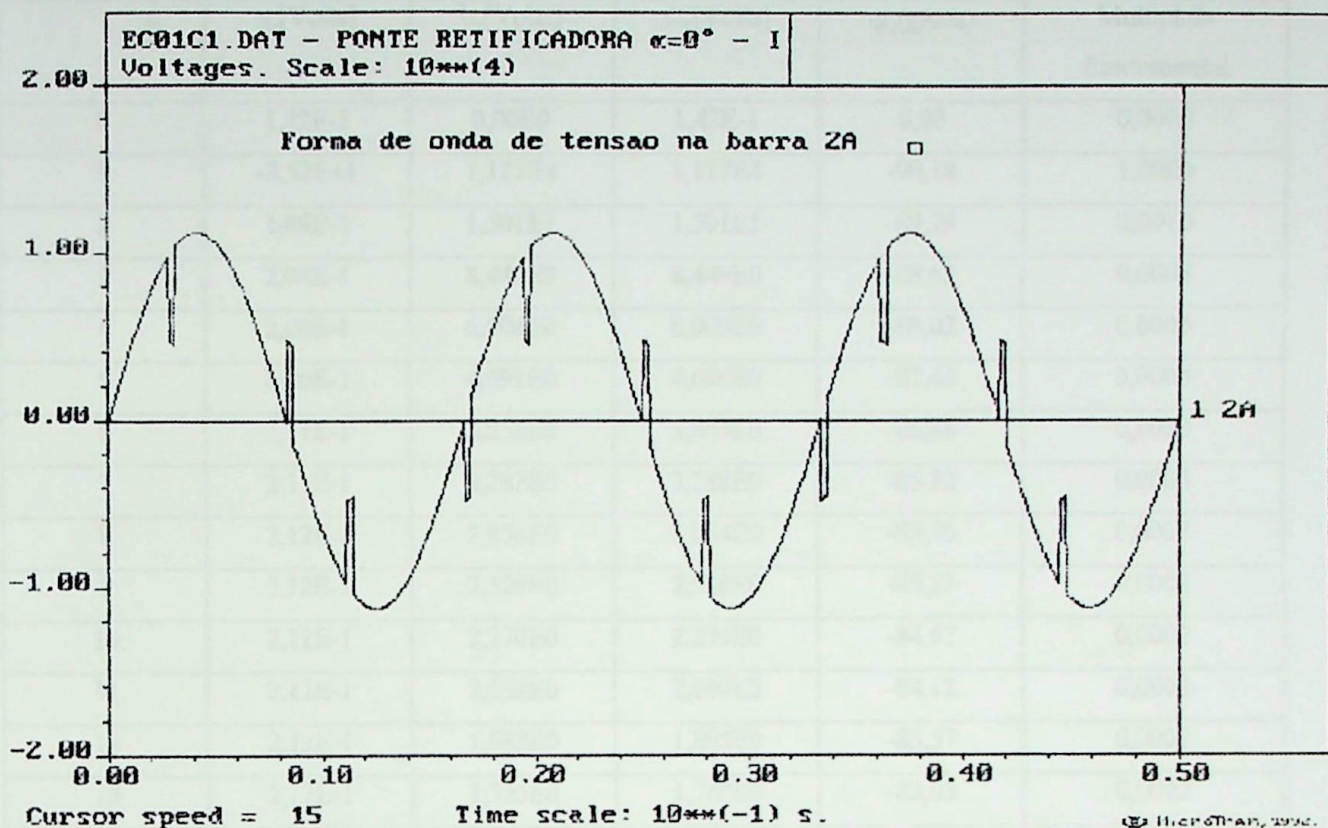


Figura 14 - Forma de onda da tensão da barra 2A.

Figura 15 - Forma de onda da corrente I_A .



n	a_n [Volts]	b_n [Volts]	C_n [Volts]	ψ_n (graus)	Multipl.da fundamental
0	1,42E-1	0,00E0	1,42E-1	0,00	0,0000
1	-3,52E+1	1,127E4	1,127E4	-90,18	1,0000
2	1,89E-1	1,501E1	1,501E1	-89,29	0,0013
3	2,04E-1	8,447E0	8,449E0	-88,62	0,0007
4	2,08E-1	6,006E0	6,009E0	-88,02	0,0005
5	2,10E-1	4,691E0	4,696E0	-87,44	0,0004
6	2,11E-1	3,856E0	3,865E0	-86,88	0,0003
7	2,11E-1	3,282E0	3,288E0	-86,32	0,0003
8	2,12E-1	2,856E0	2,864E0	-85,76	0,0002
9	2,12E-1	2,529E0	2,538E0	-85,21	0,0002
10	2,12E-1	2,270E0	2,279E0	-84,67	0,0002
11	2,12E-1	2,058E0	2,069E0	-84,12	0,0002
12	2,12E-1	1,883E0	1,895E0	-83,57	0,0002
13	2,12E-1	1,735E0	1,748E0	-83,03	0,0002
14	2,12E-1	1,608E0	1,622E0	-82,48	0,0001
15	2,12E-1	1,499E0	1,514E0	-81,94	0,0001
16	2,12E-1	1,403E0	1,419E0	-81,40	0,0001,
17	2,12E-1	1,319E0	1,336E0	-80,35	0,0001
18	2,12E-1	1,244E0	1,262E0	-80,31	0,0001
19	2,12E-1	1,177E0	1,196E0	-79,77	0,0001

Tabela 2 - Tensão na barra FA



n	a_n [Volts]	b_n [Volts]	C_n [Volts]	ψ_n (graus)	Multipl.da fundamental
0	-3,232E1	0,000E0	3,232E1	0,00	0,0029
1	-1,534E2	1,114E4	1,115E4	-90,79	1,0000
2	6,654E1	2,488E1	7,104E1	-20,50	0,0063
3	6,334E1	2,144E1	6,687E1	-18,70	0,0060
4	6,007E1	2,746E1	6,605E1	-24,57	0,0059
5	-1,602E2	6,043E1	1,712E2	-159,33	0,0153
6	5,825E1	2,889E1	6,498E-1	-26,31	0,0058
7	-5,624E1	-1,575E2	1,673E2	109,65	0,0150
8	5,512E1	4,325E1	7,006E1	-38,12	0,0062
9	5,112E1	3,806E1	6,377E1	-36,67	0,0057
10	3,891E2	4,560E1	5,994E1	-49,53	0,0053
11	-1,592E2	-1,442E1	1,559E2	174,83	0,0143
12	4,126E1	4,519E1	6,120E1	-47,60	0,0054
13	1,653E1	-1,581E2	1,590E2	84,03	0,0142
14	2,943E1	6,145E1	6,813E1	-64,41	0,0061
15	3,048E1	5,037E1	5,887E1	-58,82	0,0052
16	1,158E1	5,119E1	5,249E1	-77,26	0,0047
17	-1,239E2	-7,389E1	1,443E2	149,19	0,0129
18	1,883E1	5,204E1	5,534E1	-70,11	0,0049
19	7,537E1	-1,231E2	1,443E2	58,52	0,0129

Tabela 3 - Tensão na Barra BA



n	a_n [Volts]	b_n [Volts]	C_n [Volts]	ψ_n (graus)	Multipl.da fundamental
0	9,667E1	0,00E0	9,667E1	0,00	0,0088
1	-3,890E2	1,089E4	1,089E4	-92,05	1,0000
2	1,992E2	4,460E1	2,042E2	-12,62	0,0187
3	1,896E2	4,744E1	1,955E2	-14,05	0,0179
4	1,798E2	7,037E1	1,931E2	-21,37	0,0177
5	-4,810E2	1,719E2	5,108E2	-160,33	0,0468
6	1,743E2	7,867E1	1,912E2	-24,29	0,0175
7	-1,691E2	-4,791E2	5,081E2	109,44	0,0466
8	1,649E2	1,240E2	2,064E2	-36,94	0,0189
9	1,529E2	1,091E2	1,879E2	-35,51	0,0172
10	1,163E2	1,322E2	1,761E2	-48,67	0,0161
11	-4,782E2	-4,738E1	4,805E2	174,34	0,0441
12	1,234E2	1,318E2	1,805E2	-46,89	0,0165
13	4,915E1	-4,778E2	4,804E2	84,13	0,0440
14	8,785E1	1,811E2	2,013E2	-64,12	0,0184
15	9,101E1	1,481E2	1,738E2	-58,43	0,0159
16	3,431E1	1,508E2	1,546E2	-77,18	0,0141
17	-3,721E2	-2,243E2	4,345E2	148,92	0,0398
18	5,606E1	1,536E2	1,635E2	-69,95	0,0150
19	2,257E2	-3,716E2	4,348E2	58,73	0,0399

Tabela 4 - Tensão na barra 2A



n	a _n [Ampères]	b _n [Ampères]	C _n [Ampères]	ψ _n (graus)	Multipl.da fundamental
0	6,142E0	0,000E0	6,142E0	0,00	0,0093
1	-3,515E2	5,527E2	6,550E2	-122,46	1,0000
2	1,469E1	-3,538E-1	1,469E1	1,38	0,0224
3	1,212E1	1,060E0	1,216E1	-5,00	0,0185
4	1,410E1	3,233E0	1,446E1	-12,92	0,0220
5	4,182E1	1,293E2	1,359E2	-72,08	0,2074
6	1,195E1	3,136E0	1,214E1	-10,14	0,0185
7	-6,279E1	5,743E1	8,509E1	-137,55	0,1299
8	1,430E1	2,572E0	1,453E1	-10,20	0,0221
9	1,148E1	3,069E0	1,188E1	-14,97	0,0181
10	1,261E1	5,708E0	1,385E1	-24,35	0,0211
11	4,042E0	6,046E1	6,059E1	-86,17	0,0925
12	1,098E1	4,037E0	1,170E1	-20,18	0,0178
13	-3,486E1	1,738E1	3,895E1	-153,51	0,0594
14	1,270E1	5,176E0	1,396E1	-21,76	0,0213
15	1,028E1	4,756E0	1,133E1	-24,82	0,0172
16	1,047E1	7,483E0	1,286E1	-35,56	0,0196
17	-6,196E0	3,574E1	3,627E1	-99,84	0,0553
18	9,515E0	5,498E0	1,099E1	-30,02	0,0167
19	-2,051E1	3,250E0	2,077E1	-171,00	0,0317

Tabela 5 - Corrente de linha I_A.

4.3 - MODELAGEM PARA ESTUDO DE HARMÔNICOS.

Definem-se fatores de distorção de tensão e corrente como sendo:

. Fatores individuais de distorção de tensão e corrente:

$$FD_{um}\% = \frac{U_n}{U_1} .100$$

$$FD_{in}\% = \frac{I_n}{I_1} .100$$



. Fatores totais de distorção total de tensão e corrente:

$$FD_u\% = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \cdot 100$$

$$FD_i\% = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \cdot 100$$

O fator de distorção total mede de forma quantitativa, o quanto uma onda está distorcida. É zero se a onda for puramente senoidal.

Os fatores individuais de distorção mostram o quanto cada harmônico de tensão ou corrente influencia na distorção total da onda.

Das ondas analisadas no item anterior, têm-se os seguintes fatores de distorção total:

Tensão da barra FA : $FD_u\% = 0,18\%$ (devido a erros do HARMONIC, pois sendo esta onda senoidal, o F.D. total é nulo)

Tensão da barra BA : $Fd_u\% = 4,40\%$

Tensão da barra 2A : $Fd_u\% = 13,47\%$

Corrente I_A : $Fd_i\% = 28,90\%$.

Para o estudo envolvendo harmônicos, pode-se modelar a carga não linear, como fontes ideais de harmônicos de corrente. As fontes de tensão à frequência fundamental neste modelo são postas em repouso (curto-circuitadas). Assim, uma representação monofásica da ponte conversora mostrada na figura 11, para um harmônico de ordem n, fica:

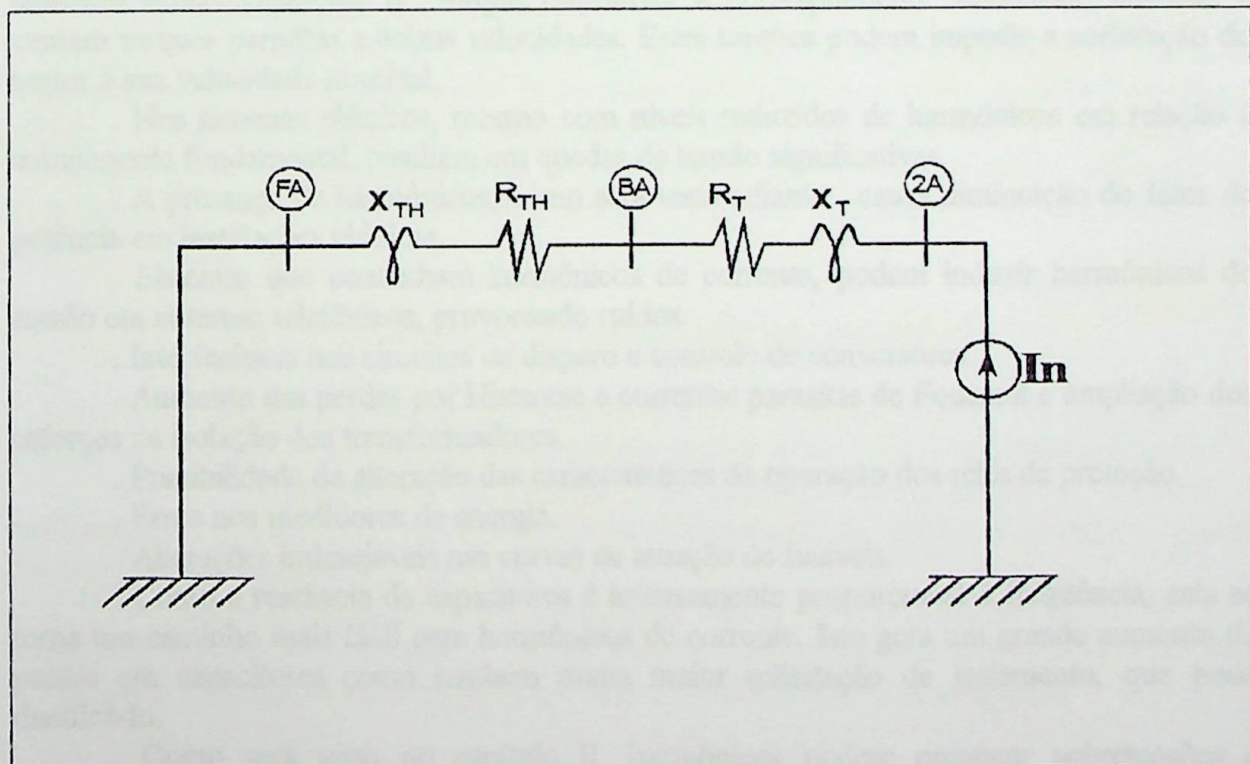


Figura 16 - Circuito equivalente com relação a um harmônico de ordem n.



Como visto na simulação, a forma de onda da tensão da barra BA é menos distorcida que a da barra 2A. O cálculo dos fatores de distorção individual e total confirma este fato.

Podem-se também chegar a esta mesma conclusão, através do equivalente monofásico mostrado na figura 16. A tensão para cada harmônico na barra BA será menor que para a barra 2A, pelo fato de o sistema elétrico ser “mais forte” em BA (impedância do sistema “visto” desta barra = Z_{TH}) do que para 2A (impedância de Thevenin do sistema “visto” desta barra = $Z_{TH} + Z_T$). Para a barra FA, não haverá distorção alguma, pois todos os harmônicos de tensão nesta barra terão amplitudes iguais a zero, visto que neste ponto, o sistema teoricamente é infinitamente forte (impedância do sistema “visto” desta barra é zero).

Assim, conclui-se que num sistema elétrico com cargas não lineares, poderá haver pontos onde o nível de curto-circuito seja suficientemente grande (impedância de Thevenin suficientemente pequena) para que não haja muita distorção na onda de tensão nestes pontos. Conclui-se também que pontos eletricamente mais próximos de uma Carga Elétrica Especial terão maiores fatores de distorção de tensão, tanto total como individual.

4.4 - PROBLEMAS CRIADOS POR HARMÔNICOS

Como visto no item anterior, quanto mais eletricamente próxima estiver uma barra da carga elétrica especial responsável pelos harmônicos, mais distorcida será a onda de tensão nesta barra. Qualquer carga ligada a uma barra com onda de tensão distorcida estará sujeita a problemas originados por harmônicos.

De forma resumida, os problemas causados por harmônicos são:

- . Em máquinas rotativas, os harmônicos de tensão e corrente resultam no aumento de perdas nos enrolamentos do estator e rotor. No caso dos motores de indução, os harmônicos reduzem substancialmente o torque disponível a correspondente velocidade nominal e causam torques parasitas a baixas velocidades. Estes torques podem impedir a aceleração do motor à sua velocidade nominal.

- . Nos sistemas elétricos, mesmo com níveis reduzidos de harmônicos em relação à componente fundamental, resultam em quedas de tensão significativas.

- . A presença de harmônicos, como será visto adiante, causa diminuição do fator de potência em instalações elétricas.

- . Sistemas que contenham harmônicos de corrente, podem induzir harmônicos de tensão em sistemas telefônicos, provocando ruídos.

- . Interferência nos circuitos de disparo e controle de conversores.

- . Aumento das perdas por Histerese e correntes parasitas de Foucault e ampliação dos esforços na isolação dos transformadores.

- . Possibilidade da alteração das características de operação dos relés de proteção.

- . Erros nos medidores de energia.

- . Alterações indesejáveis nas curvas de atuação de fusíveis.

- . Como a reatância de capacitores é inversamente proporcional à frequência, esta se torna um caminho mais fácil para harmônicos de corrente. Isto gera um grande aumento de perdas em capacitores como também numa maior sollicitação de isolamento, que pode danificá-lo.

- . Como será visto no capítulo II, harmônicos podem provocar sobretensões e sobrecargas no sistema elétrico devido ao fenômeno da ressonância.



4.5 - FORMAS DE SE MINIMIZAR OS EFEITOS DOS HARMÔNICOS

As principais formas de redução de harmônicos são:

a) Aumento do número de pulsos para pontes conversoras

Pode-se demonstrar que para pontes conversoras, a ordem dos harmônicos característicos de corrente são dados pelas relações:

$$\begin{array}{ll} n = 6.N \pm 1, \text{ ou seja: } 5, 7, 11, 13, 17, \dots & \text{para pontes de 6 pulsos.} \\ n = 12N \pm 1, \text{ ou seja: } 11, 13, 23, 25, \dots & \text{para pontes de 12 pulsos.} \end{array}$$

e assim sucessivamente, existindo também pontes de 36 e 48 pulsos. Conclui-se que aumentando o número de pulsos para conversores, diminuem-se os harmônicos de corrente injetados na rede, pois eliminam-se harmônicos característicos.

Entretanto, instalações com número de pulsos elevados são encontradas apenas em sistemas industriais (24, 36, 48 pulsos). A razão da não utilização deste processo de eliminação de harmônicos para os sistemas de transmissão em corrente contínua é a de que os problemas de isolamento encontrados para os transformadores, determinam que suas conexões sejam as mais simples possíveis. Deste modo, um sistema conversor de 12 pulsos, utilizando um transformador YY e outro DY constitui-se uma boa solução.

b) Instalação de filtros de harmônicos.

Uma outra solução para redução de harmônicos no sistema é a de instalar filtros. Estes, como será visto adiante, absorvem os harmônicos de corrente produzidos por uma carga elétrica especial (ou "prendem" os harmônicos de corrente no caso do filtro tipo série), não deixando que estes harmônicos fluam para o restante do sistema elétrico de potência.

Em um sistema de conversores, a solução mais econômica tem sido a utilização de sistemas de 12 pulsos e filtros de harmônicos (como o utilizado no sistema HVDC de Itaipu).

c) Instalação de conexão Delta em transformador.

Devido aos harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos estarem em fase, estes são eliminados pela circulação das correntes destes harmônicos nos "deltas dos transformadores".

Assim, a conexão DD é utilizada para fornos a arco, fornos de indução e retificadores. A conexão YD é utilizada para abaixamento de tensão de sistemas usando grandes transformadores.

A conexão DY é usada para a elevação de tensão para alimentação de uma linha de transmissão. Como as tensões de 3º harmônicos são eliminadas, o neutro é disponível para aterramento, e ambos os enrolamentos são empregados nas melhores condições.



5 - FATOR DE POTÊNCIA

5.1 - CONCEITUAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Fator de potência (F.P.) de uma carga ou de uma instalação é por definição a relação entre a potência média (potência útil) e a potência aparente. Assim:

$$F.P = \frac{P}{S}$$

Onde, da teoria de circuitos elétricos, a potência média (P) é aquela obtida pela integração da curva da potência instantânea ($p(\theta) = u(\theta) \cdot i(\theta)$, onde $\theta = \omega \cdot t$). Assim, tem-se:

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

A potência aparente (S) é o produto dos valores eficazes da tensão e corrente. Normalmente, esta potência é a que define a capacidade dos equipamentos.

Tem-se então:

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef}$$

Onde, os valores eficazes de tensão e corrente são dados pela raiz média quadrática. Assim:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} [u(\theta)]^2 \cdot d\theta}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} [i(\theta)]^2 \cdot d\theta} \quad \theta = \omega \cdot t$$

5.2 - CONCEITUAÇÃO DO FATOR DE DESLOCAMENTO

Fator de deslocamento (F_{desl}) é por definição, o cosseno do ângulo entre dois sinais de corrente e tensão que estão na mesma frequência.

$$F_{desl} = \cos \phi$$

Ao ângulo ϕ , é dado o nome de ângulo de deslocamento.



5.3 - FATOR DE POTÊNCIA SEM A PRESENÇA DE HARMÔNICOS.

Neste caso, onde as ondas de tensão e corrente são puramente senoidais, pode-se demonstrar através das equações do item 5.1, que o fator de potência é numericamente igual ao fator de deslocamento. Assim, tem-se:

$$F.P. = \cos \phi$$

5.4 - FATOR DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE HARMÔNICOS.

Têm-se aqui dois casos a analisar. O primeiro caso é quando a fonte de tensão é senoidal e há apenas harmônicos de corrente. O segundo caso é quando, tanto a fonte possui harmônicos de tensão quanto a carga possui harmônicos de corrente.

1º caso: Fonte de tensão senoidal e harmônicos de corrente de carga:

Tem-se que:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{onde } U_1 \text{ é o valor eficaz da onda de tensão}$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t - \phi_n)$$

Pode-se demonstrar matematicamente, através das equações do item 5.1, que o fator de potência neste caso será:

$$F.P. = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1)}{U_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (I_n)^2}}$$

Onde: ϕ_1 = ângulo de deslocamento para a componente fundamental

I_n = valor eficaz de corrente para um harmônico de ordem n.

2º caso: Fonte de tensão com harmônicos e cargas com harmônicos de corrente.

Tem-se neste caso que:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t - \phi_{un})$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t - \phi_{in})$$



onde: φ_{un} = ângulo de fase da tensão para um harmônico de ordem n.
 φ_{in} = ângulo de fase da corrente para um harmônico de ordem n.
 U_n e I_n , valores eficazes de tensão e corrente para um harmônico de ordem n.

Pode-se demonstrar matematicamente, através das equações do item 5.1, que o fator de potência será, neste caso, dado por:

$$F.P = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}} \quad \varphi_n = \varphi_{un} - \varphi_{in}$$

Observa-se que esta última equação comporta-se como uma equação geral envolvendo os outros dois casos abordados.

Conclui-se também que harmônicos fazem diminuir o fator de potência.

Tem-se da teoria de circuitos elétricos para ondas senoidais que:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

onde: S = Potência aparente.
P = Potência ativa.
Q = Potência reativa.

Ou seja, o triângulo de potência mostrado na figura 17.

É mostrado em [1], uma outra maneira para a análise quando há o envolvimento de harmônicos. Assim, aparece uma quarta grandeza que é a potência reativa H devido aos harmônicos. Pode-se demonstrar matematicamente que:

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + H^2$$

onde: Q_1 = Potência reativa à frequência fundamental.
H = Potência reativa devido aos harmônicos.

Tem-se agora, ao invés de um triângulo, um tetraedro de potência mostrado na figura 18.

Na prática, corrige-se o fator de potência na frequência fundamental. Assim, para compensar as diferenças do fator de potência que possam surgir devido aos harmônicos, deve-se corrigi-lo acima do valor desejado. Assim, no caso onde se deseja corrigir o fator de potência para 0,92, deve-se efetuar os cálculos para 0,94.

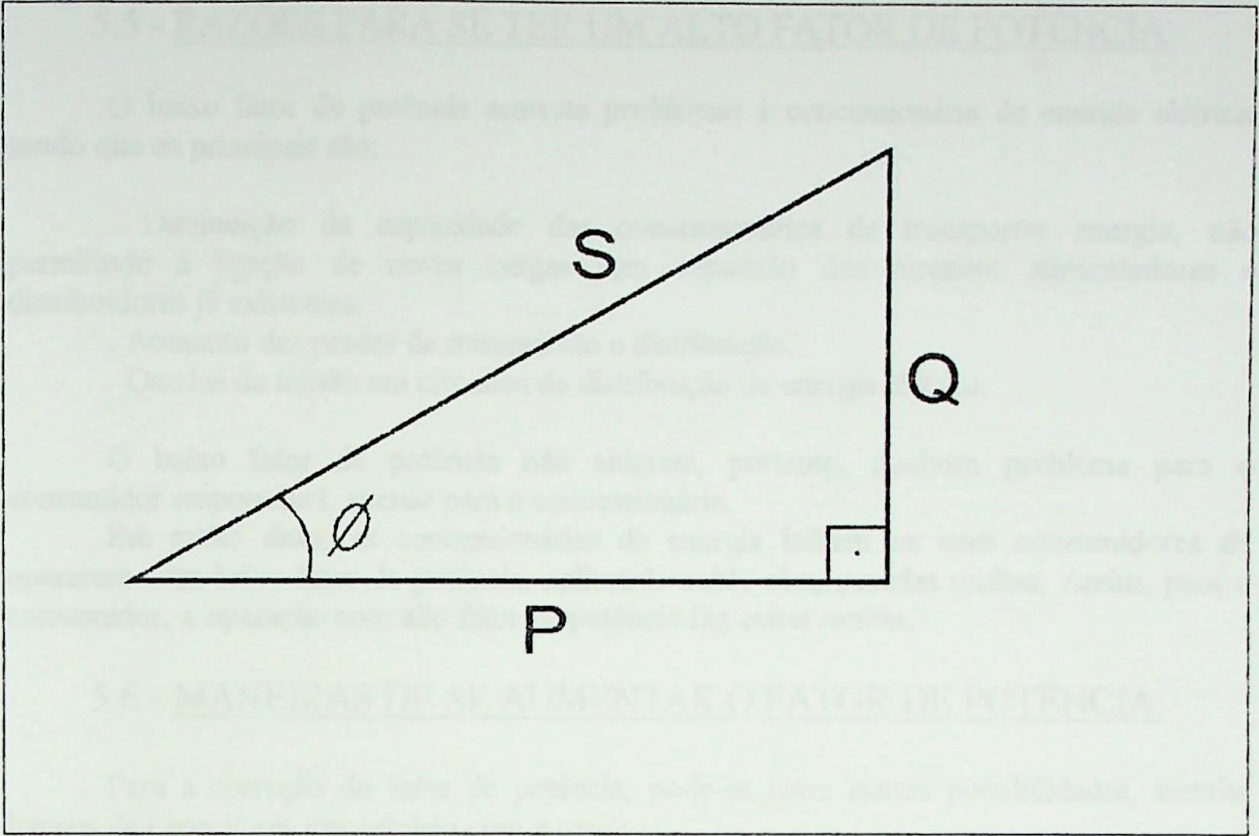


Figura 17 - Triângulo de Potência - Caso senoidal.

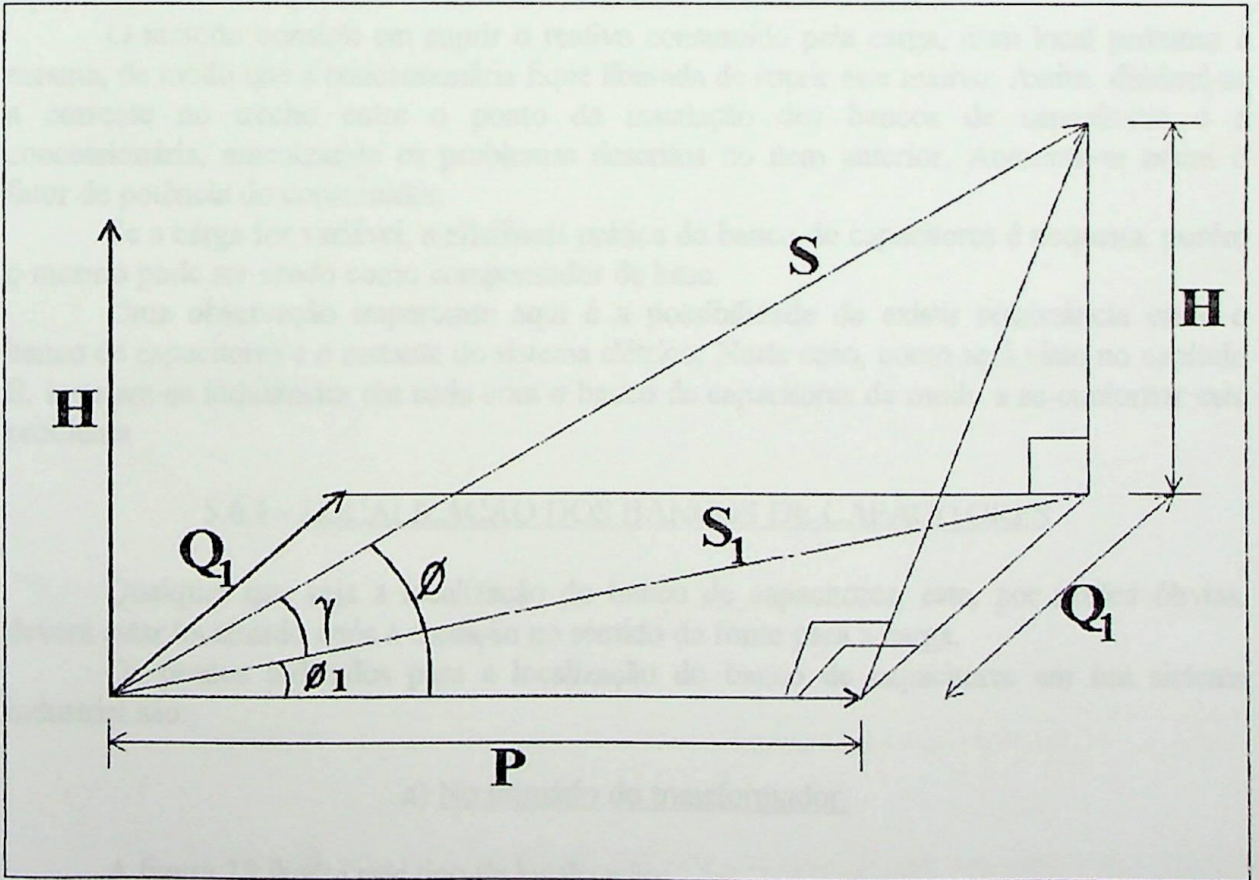


Figura 18 - Tetraedro de Potência.



5.5 - RAZÕES PARA SE TER UM ALTO FATOR DE POTÊNCIA.

O baixo fator de potência acarreta problemas à concessionária de energia elétrica, sendo que os principais são:

. Diminuição da capacidade das concessionárias de transportar energia, não permitindo a ligação de novas cargas sem expansão dos circuitos alimentadores e distribuidores já existentes.

. Aumento das perdas de transmissão e distribuição.

. Quedas de tensão em circuitos de distribuição de energia elétrica.

O baixo fator de potência não acarreta, portanto, nenhum problema para o consumidor responsável, apenas para a concessionária.

Em razão disto, as concessionárias de energia inibem os seus consumidores de operarem com baixo fator de potência, aplicando sobre eles, pesadas multas. Assim, para o consumidor, a operação com alto fator de potência faz evitar multas.

5.6 - MANEIRAS DE SE AUMENTAR O FATOR DE POTÊNCIA.

Para a correção do fator de potência, pode-se entre outras possibilidades, instalar bancos de capacitores em paralelo com a carga.

Apenas a utilização de bancos de capacitores em paralelo com a carga será analisada aqui, tendo em vista que esta é a maneira mais barata e a mais utilizada.

O método consiste em suprir o reativo consumido pela carga, num local próximo à mesma, de modo que a concessionária fique liberada de suprir este reativo. Assim, diminui-se a corrente no trecho entre o ponto da instalação dos bancos de capacitores e a concessionária, amenizando os problemas descritos no item anterior. Aumenta-se assim o fator de potência do consumidor.

Se a carga for variável, a eficiência prática do banco de capacitores é pequena, porém o mesmo pode ser usado como compensador de base.

Uma observação importante aqui é a possibilidade de existir ressonância entre o banco de capacitores e o restante do sistema elétrico. Neste caso, como será visto no capítulo II, instalam-se indutâncias em série com o banco de capacitores de modo a se contornar este problema

5.6.1 - LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

Qualquer que seja a localização do banco de capacitores, este, por razões óbvias, deverá estar localizado após a medição no sentido da fonte para a carga.

Os pontos indicados para a localização do banco de capacitores em um sistema industrial são:.

a) No primário do transformador.

A figura 19 ilustra este tipo de localização:

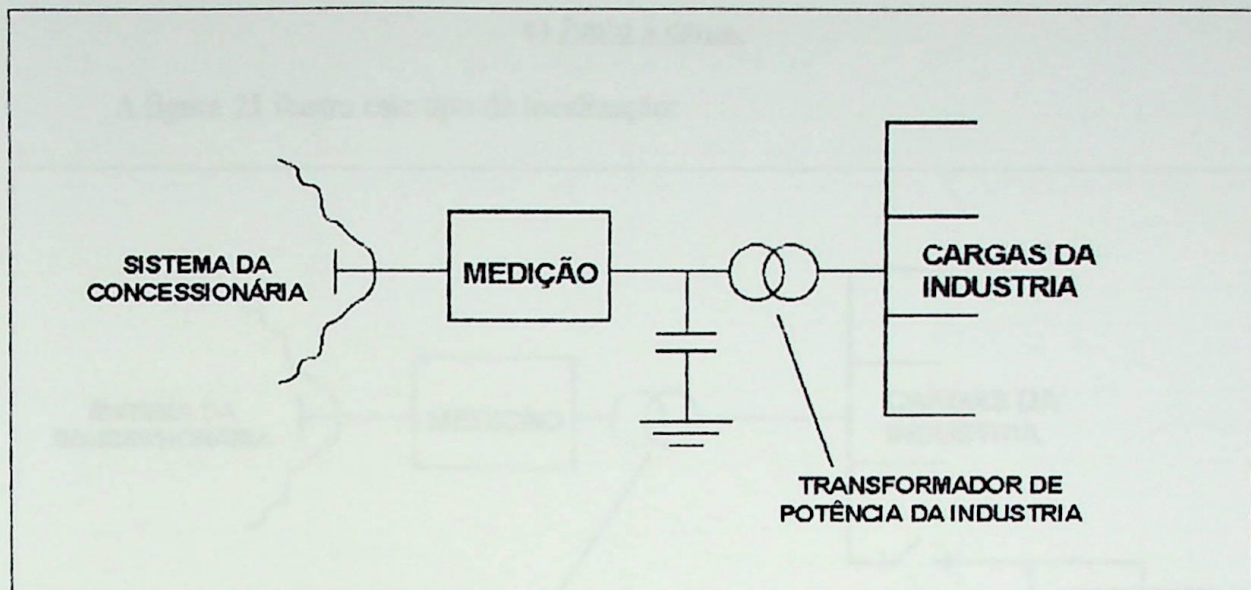


Figura 19 - Banco de capacitores no primário do transformador.

O custo desta instalação é, em geral superior a um banco equivalente localizado no secundário do transformador.

A principal desvantagem desta localização é a de não permitir a liberação da potência do transformador ou dos secundários da instalação consumidora

b) No secundário do transformador.

A figura 20 ilustra este tipo de localização:

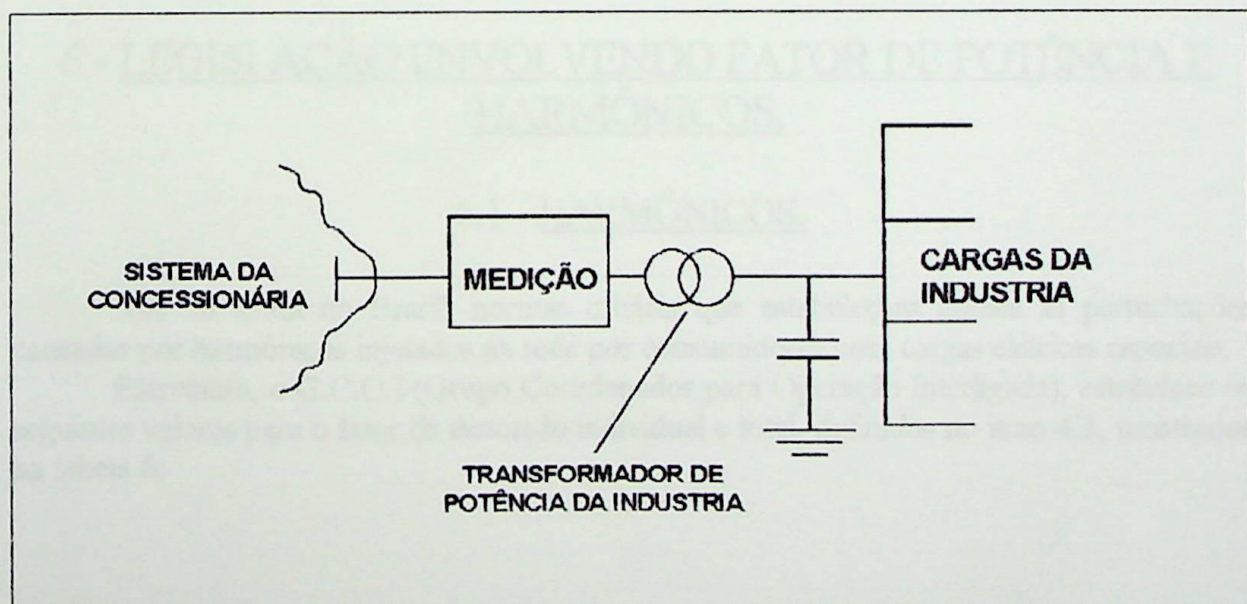


Figura 20 - Banco de capacitores no secundário do transformador.

Esta localização tem sido de prática comum por resultar em menores custos finais e maiores benefícios. Tem como principal vantagem, a de liberar a potência do transformador.



c) Junto à carga.

A figura 21 ilustra este tipo de localização:

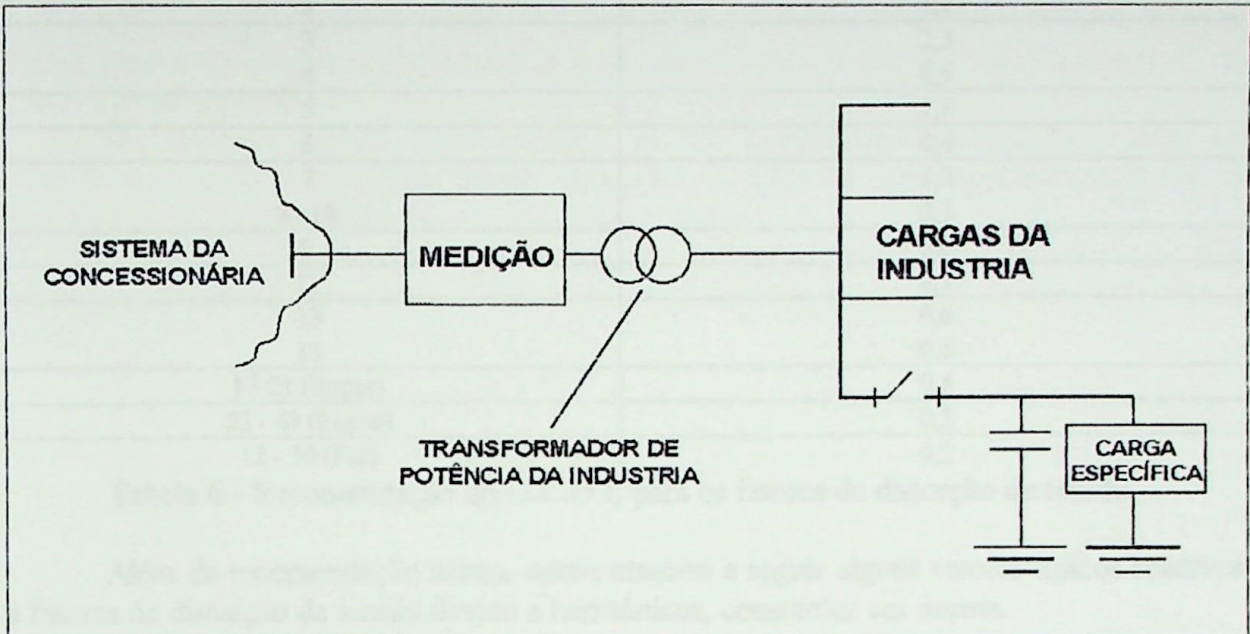


Figura 21 - Banco de capacitores junto a carga.

Esta localização é usada quando uma carga específica possui um baixo fator de potência, como por exemplo, motores.

6 - LEGISLAÇÃO ENVOLVENDO FATOR DE POTÊNCIA E HARMÔNICOS.

6.1 - HARMÔNICOS.

Não há ainda no Brasil, normas oficiais que estabeleçam limites às perturbações causadas por harmônicos injetados na rede por consumidores com cargas elétricas especiais.

Entretanto, o G.C.O.I (Grupo Coordenador para Operação Interligada), estabelece os seguintes valores para o fator de distorção individual e total, definidos no item 4.3, mostrados na tabela 6:

4.2 - FATOR DE POTÊNCIA

Com o objetivo de reduzir as perturbações de tensão causadas por consumidores com cargas elétricas especiais, o G.C.O.I (Grupo Coordenador para Operação Interligada) estabelece os seguintes valores para o fator de distorção individual e total, definidos no item 4.3, mostrados na tabela 6:



RECOMENDAÇÃO ELETROBRÁS GCOI SCEL/CECE - FEVEREIRO/93 (PARA $U_{REDE} \geq 69$ [kV])	
H	FD_{uh}
2	1,2
3	2,3
4	0,6
5	1,4
6	0,4
7	1,0
8 e 10	0,3
9	0,8
11	0,7
13	0,6
15	0,6
17-21 (Ímpar)	0,4
23 - 49 (Ímpar)	0,3
12 - 50 (Par)	0,2

Tabela 6 - Recomendação do G.C.O.I. para os fatores de distorção de tensão.

Além da recomendação acima, apresentam-se a seguir alguns valores típicos relativos a fatores de distorção de tensão devido a harmônicos, constantes em norma.

IEEE STD 519 - 1992		
$U_{REDE AC}$ [kV]	FD_{UH} (%)	F_{DU} (%)
≤ 69	3,0	5,0
69,01 - 161	1,5	2,5
$\geq 161,01$	1,0	1,5

G R.3 (1976) UNITED KINGDOM			
$U_{REDE AC}$ [kV]	FD_{UH} (%) (II - Ímpar)	FD_{UH} (%) (II - Par)	FD (%)
0,0 - 0,415	4,0	2,00	5,0
6,6 e 11	3,0	1,75	4,0
33 e 66	2,0	1,00	3,0
>132	1,0	0,50	1,5

SEN 21 1811 (1976 -11 -15) SWEDEM		
$U_{REDE AC}$ [kV]	FD_{UH} (%)	F_{DU} (%)
$\geq 0,430$	3,0	4,0
3,3 - 24	2,5	3,0
36 - 72	1,5	2,0
>84	0,7	1,0

6.2 - FATOR DE POTÊNCIA

Com o objetivo de reduzir as necessidades de investimentos para a ampliação da capacidade do Sistema Elétrico Brasileiro, o DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), a partir da portaria 1569, decidiu elevar o fator de potência de 0,85 para



0,92, considerando o fator de potência de referência 0,92 indutivo entre as 6 horas e 24 horas e 0,92 capacitivo entre as 0:00 e 6 horas.

O fator de potência para fins de faturamento é definido como sendo o cosseno do arco tangente do quociente da energia reativa consumida pela energia ativa.

Assim, a multa a ser cobrada do consumidor é sobre o somatório do excedente de reativo consumido e demandado hora a hora, observando o horário de faturamento, se indutivo ou se capacitivo.

Não sendo o objetivo deste trabalho, discutir a legislação envolvendo o fator de potência, propositadamente não foram colocadas as fórmulas que permitam calcular o faturamento de energia reativa consumida e demandada.

Como ilustração, a tabela seguinte mostra resumidamente como é o critério para a cobrança de multa devido ao baixo fator de potência em alguns países do mundo, inclusive o Brasil.

PAÍS	CATEGORIA	REFER. Ind.	REFER. Cap.	PERÍODO DE AVALIAÇÃO
SUÉCIA - A	AT	0,97		MENSAL
SUÉCIA - B	MT	0,89		MENSAL
FRANÇA	AT E MT	0,92		MENSAL
CANADÁ (ONTÁRIO)	AT E MT	0,90		HORÁRIO
CANADÁ (QUEBEC)	AT E BT	0,90		MENSAL
ESPAÑA	AT E BT	0,90	0,90	BIMESTRAL
FINLÂNDIA	AT	0,98	0,98	HORÁRIO
ÁFRICA DO SUL	AT E BT	0,98	1,00	HORÁRIO
ALEMANHA	AT	0,89		MENSAL
ITALIA	AT, MT E BT	0,89		MENSAL
TAILÂNDIA	AT, MT E BT	0,85		MENSAL
BÉLGICA - A	MT	0,90	0,90	MENSAL
BÉLGICA - B	AT	0,95	0,95	MENSAL
INGLATERRA	AT	0,95		MENSAL
ESTADOS UNIDOS	AT	0,95	0,95	15 MINUTOS
PORTUGAL	AT, MT E BT	0,93	1,00	MENSAL
BRASIL	AT, MT E BT	0,92	0,92	HORÁRIO

BT - Baixa tensão

MT - Média tensão

AT - Alta tensão

CAPÍTULO II

***BANCOS DE CAPACITORES
E FILTROS***



1 - CAPACITORES DE POTÊNCIA

Capacitores de potência são equipamentos utilizados no sistema elétrico, visando basicamente à correção do fator de potência das cargas. Outras aplicações de capacitores de potência no sistema elétrico são a compensação série e paralela de linhas de transmissão, correção de desequilíbrio de cargas e nos filtros de harmônicos.

1.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os capacitores de potência são caracterizados por sua potência reativa nominal, sendo fabricados em unidades monofásicas ou trifásicas para alta e baixa tensão.

Basicamente, capacitores são equipamentos constituídos por duas placas paralelas, existindo entre elas um meio dielétrico. Assim sendo, aplicando-se uma diferença de potencial entre os terminais de um capacitor, este tem a propriedade de armazenar carga elétrica (energia) em seu campo elétrico. A capacidade de armazenamento de carga elétrica de um capacitor é medida através de sua capacitância

Assim, sendo, a carga elétrica armazenada em um capacitor é diretamente proporcional à tensão aplicada e a sua capacitância. Tem-se então que:

$$Q = C \cdot U \quad (1)$$

onde:

Q= Carga elétrica armazenada nos terminais do capacitor, em [C].

C= Capacitância do capacitor, em [F]

U= Tensão aplicada aos terminais do capacitor, em [V].

A capacitância depende das características geométricas e do meio dielétrico utilizado, podendo ser calculado por:

$$C = \frac{k \cdot \epsilon \cdot A}{d \cdot 10^{-12}} \quad (2)$$

onde:

ϵ =Permissividade dielétrica.

A=Área dos eletrodos [m^2].

d=distância entre os eletrodos [m].

k=constante dielétrica do material isolante.

A constante dielétrica é dada pela relação das capacitâncias de dois capacitores de mesma geometria, sendo que em um deles é usado como dielétrico o material a ser estudado e no outro, o vácuo. Assim:

$$k = \frac{C}{C_0} \quad (3)$$

onde:

C_0 = Capacitância do capacitor cujo dielétrico é o vácuo.



C = Capacitância a ser observada, cujo dielétrico é o material a ser estudado.

Assim, um capacitor com um dielétrico de constante k apresenta entre as armaduras uma intensidade de campo elétrico k vezes menor que a intensidade do campo elétrico no vácuo.

Como exemplo de constantes dielétricas, tem-se a tabela 1:

Dielétrico	vácuo	ar	papel	mica	água	borracha	vidro
K	1	1,00054	3,5	5,4	7,8	3 a 35	5 a 10

Tabela 1 - Constantes dielétricas.

1.1.1 - CORRENTE NO CAPACITOR

Para um capacitor de capacitância constante, tem-se da equação (1), que a sua carga varia diretamente com a tensão aplicada em seus terminais. Assim sendo, derivando ambos os membros desta equação em relação ao tempo, resulta:

$$\frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt}$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (4)$$

Seja agora os seguintes exemplos:

Exemplo 1:

Seja calcular a corrente $i(t)$ do circuito RC da figura 1, onde $R=10$ [Ω], $C=10$ [F], $v(t)=100$ [V] e $q(0)=0$

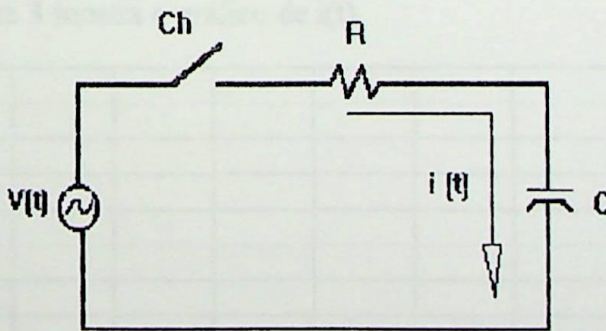


Figura 1 - Circuito RC.

Da Lei de Kirchoff, tem-se



$$v(t) = v_R + v_C$$

$$100 = 10 \cdot i + \frac{q}{10^{-3}}$$

$$dQ/dt + 100 \cdot q = 10$$

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

que se trata de uma equação diferencial linear, tendo como solução:

$$q(t) = \frac{1}{10} \cdot [1 - e^{-100 \cdot t}]$$

A figura 2 mostra o gráfico de $q(t)$:

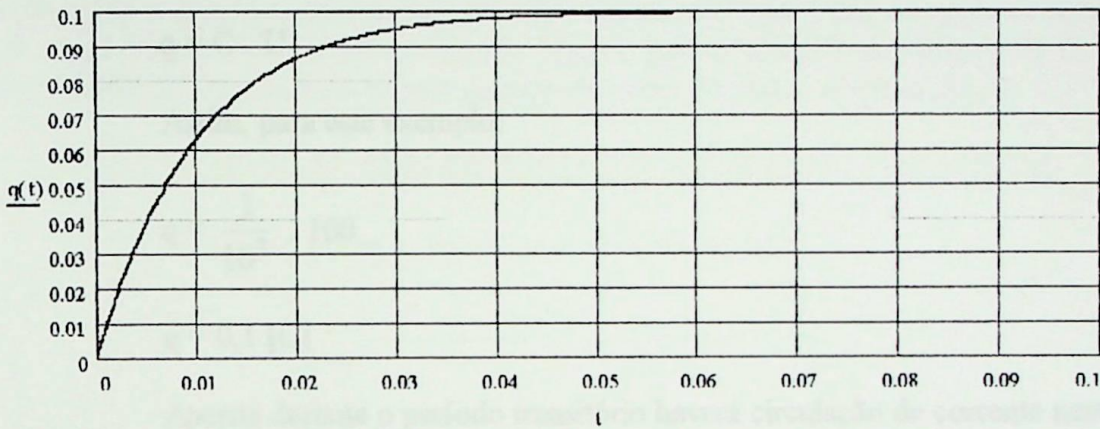


Figura 2 - Gráfico de $q(t)$.

A corrente $i(t)$ será:

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

$$i(t) = 10 \cdot e^{-100 \cdot t}$$

A figura 3 mostra o gráfico de $i(t)$

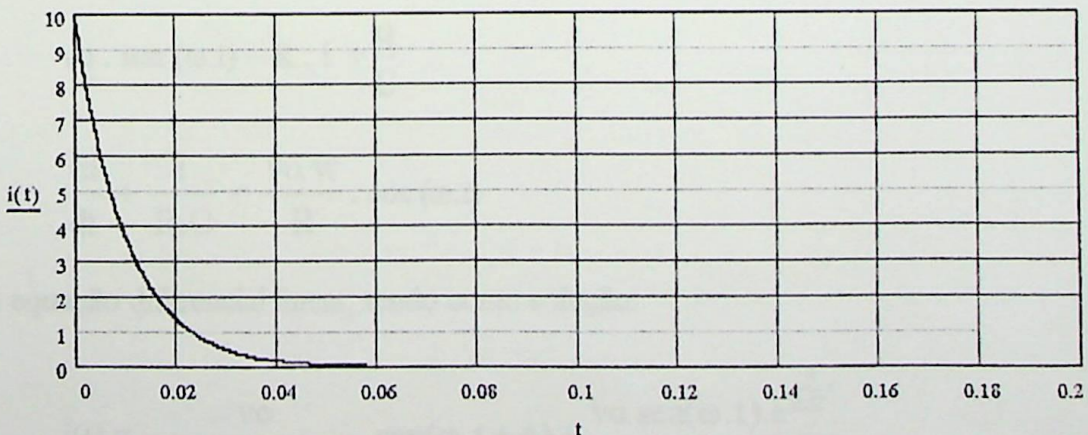


Figura 3 - Gráfico de $i(t)$



Observa-se que aplicando uma tensão contínua sobre o capacitor, este não se carrega instantaneamente. Havendo, portanto, um intervalo de tempo para o carregamento, denominado transitório.

A duração deste transitório pode ser estimada através da constante de tempo do circuito, que neste caso é:

$$\tau = R \cdot C = 0.01 \text{ [Seg]}$$

Ou seja, quanto menor for o valor de $R \cdot C$ do circuito, mais rápido será o carregamento do capacitor. Após o carregamento, o circuito entra em regime permanente, onde vale a equação:

$$q = C \cdot U$$

Assim, para este exemplo:

$$q = \frac{1}{10^3} \cdot 100$$

$$q = 0,1 \text{ [C]}$$

Apenas durante o período transitório haverá circulação de corrente neste caso, pois após este período, a carga do capacitor ficará constante, não havendo mais a necessidade da circulação de corrente no circuito.

Exemplo 2:

Seja encontrar a corrente $i(t)$ do mesmo circuito do exemplo anterior, sendo que $v(t) = v_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ e $i(0) = 0$.

Procedendo da mesma maneira, tem-se:

$$v(t) = v_R + v_C$$

$$v_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = R \cdot i + \frac{q}{C}$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{i}{R \cdot C} = \frac{v_0 \cdot \omega}{R} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

que é uma equação diferencial linear, tendo como solução:

$$i(t) = \frac{v_0}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \phi) + \frac{v_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}$$



Onde: $\tau = R \cdot C =$ Constante de tempo

$$\text{sen}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C \cdot R)^2}} \quad ; \quad \text{cos}(\phi) = \frac{\omega \cdot C \cdot R}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}}$$

Observa-se novamente que existe um processo transitório (segunda parcela da equação $i(t)$) cuja duração dependerá da constante de tempo do circuito $\tau = R \cdot C$.

Nota-se também que no regime permanente (primeira parcela da equação de $i(t)$), aparecerá um ângulo de defasagem (ϕ) entre a tensão senoidal aplicada e a corrente estabelecida. Este ângulo dependerá da relação R/X_c , onde $X_c = 1/(\omega \cdot C)$. Quanto maior for a relação, mais o ângulo se aproximará de zero, e quanto menor, mais o ângulo se aproximará de noventa graus. Assim, tendo-se um circuito puramente capacitivo, o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente em regime permanente será de exatos noventa graus.

1.1.2 - ENERGIA ARMAZENADA E POTÊNCIA NO CAPACITOR

Seja para análise o circuito mostrado na figura 4.

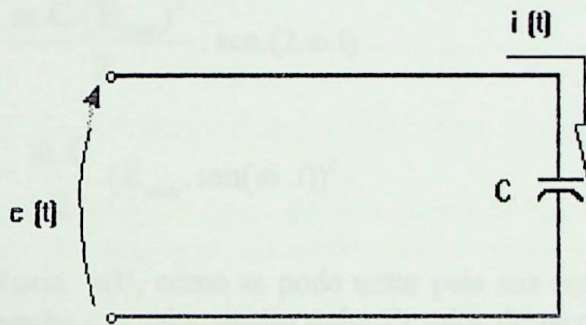


Figura 4: Circuito para análise da potência e energia armazenada no capacitor.

Tem-se que:

$$q = C \cdot e$$

$$\frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{de}{dt}$$

Disto vem que:

$$i = C \cdot \frac{de}{dt} \tag{5}$$

$$e = \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt \tag{6}$$



A potência instantânea é dada por:

$$p(t) = e(t) \cdot i(t) \quad (7)$$

A energia armazenada no capacitor no período de 0 a t é dada por:

$$E_C = \int_0^t p(t) \cdot dt \quad (8)$$

Desenvolvendo-se matematicamente esta equação, chega-se a:

$$E(t) = E_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (9)$$

Para a tensão e(t) senoidal, vem:

$$i(t) = \omega \cdot C \cdot E_{\text{máx}} \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) \quad (10)$$

$$p(t) = \frac{\omega \cdot C \cdot (E_{\text{máx}})^2}{2} \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (11)$$

$$E_C(t) = \frac{\omega \cdot C}{2} \cdot (E_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t))^2 \quad (12)$$

A potência p(t), como se pode notar pela sua equação, tem frequência duas vezes a da fonte de tensão e o valor médio nulo. O valor de pico desta potência é denotado potência reativa.

Portanto, trata-se de uma troca reversível entre o capacitor e a fonte de energia, ocorrendo duas vezes a cada ciclo da tensão e(t).

Assim como o capacitor da figura 4 tem a característica (para fonte de tensão senoidal) de fazer circular em regime permanente uma corrente noventa graus adiantada em relação à tensão aplicada, uma indutância colocada na mesma situação tem a característica de fazer circular uma corrente noventa graus atrasada em relação à tensão aplicada.

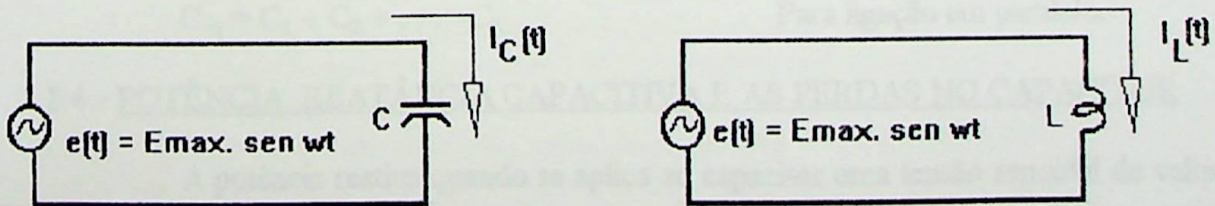


Figura 5 - Capacitância e indutância colocados sob a mesma “situação”.

Sendo assim, quando o capacitor está solicitando potência da fonte, o indutor está fornecendo potência à fonte e vice-versa, com a mesma frequência de duas vezes a da



fonte. Dependendo do valor da indutância L , a potência do capacitor e a do indutor podem ter o mesmo valor de pico (potência reativa). Assim, colocando-se a indutância e a capacitância sob o mesmo circuito, tem-se a figura 6:

Quando a capacitância estiver solicitando potência da fonte, a indutância estará liberando a mesma potência a fonte e vice-versa. Assim, a potência “solicitada” pelo capacitor num semiciclo “virá” do indutor e no outro semiciclo, a potência liberada pelo capacitor “irá” para o indutor.

Libera-se assim a fonte de fornecer potência e, por conseguinte, não haverá circulação de corrente pela fonte. Haverá uma troca reversível de energia entre a indutância e a capacitância, com frequência duas vezes a frequência da fonte de tensão.

Este, como será visto adiante, é o princípio básico da correção do fator de

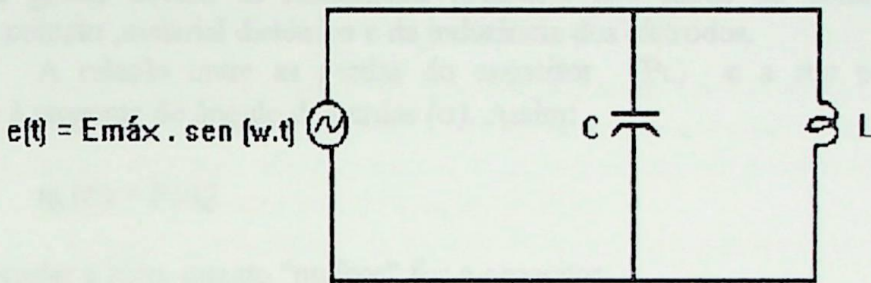


Figura 6 - Indutância e capacitância sob o mesmo circuito.

potência de uma determinada carga, que é geralmente indutiva. Assim, se colocará unidades capacitivas em paralelo com uma carga, de modo a diminuir a corrente fornecida pela fonte.

1.1.3 - ASSOCIAÇÃO DE CAPACITORES

Os capacitores podem ser ligados tanto em série como em paralelo, tendo como capacitância resultante:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad \text{Para ligação em série.}$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad \text{Para ligação em paralelo.}$$

1.1.4 - POTÊNCIA, REATÂNCIA CAPACITIVA E AS PERDAS NO CAPACITOR

A potência reativa quando se aplica ao capacitor uma tensão senoidal de valor eficaz U , pode ser dada por:

$$Q = \frac{1}{1000} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \quad (14)$$

A reatância capacitiva de um capacitor é dada por:



$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

onde:

U = Valor eficaz da tensão aplicada ao capacitor, em [kV].

Q = Potência reativa do capacitor, em [kVAr]

C = Capacitância do capacitor, em [μ F].

f = Frequência da tensão aplicada, em [Hz].

Na prática, um capacitor não apresenta uma corrente defasada de exatos noventa graus da tensão aplicada sobre ele. O valor deste ângulo se torna um pouco menor que noventa graus, devido às resistências presentes nos cabos de conexão, eletrodos, terminais de contato, material dielétrico e da indutância dos eletrodos.

A relação entre as perdas do capacitor (P_c) e a sua potência reativa corresponde à tangente do ângulo de perdas (σ). Assim:

$$\text{tg}(\sigma) = P_c/Q \quad (16)$$

que deverá tender a zero, quanto “melhor” for o capacitor.

1.2 - PROTEÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores estão sujeitos a falhas, tanto de origens externas como internas (defeitos nas unidades capacitivas que compõem o banco de capacitores). Tem-se então a necessidade de proteger os bancos de capacitores de modo a evitar danos nas demais unidades capacitivas.

A proteção da unidade capacitiva deve ser segura, rápida, e sempre tentar ao máximo isolar a unidade capacitiva defeituosa, assegurando a continuidade de serviço, que é muito importante para o sistema produtivo.

Os danos de um capacitor mal protegido podem variar desde um simples vazamento até a morte de pessoas.

A proteção de banco de capacitores envolve fusíveis e relés, que são empregados em função da potência do banco de capacitores, localização no sistema, tipo de conexão, etc...

Os principais tipos de proteção de bancos de capacitores são:

- . Fusível externo individual para cada capacitor.
- . Fusíveis internos nos elementos capacitivos que constituem o capacitor.
- . Fusíveis externos para grupos de capacitores.
- . Relés de sobrecorrente para o desligamento geral de bancos de capacitores
- . Transformador de potencial ligado em cada fase ou em cada grupo série por fase, nos bancos de capacitores ligados em estrela com neutro isolado, para identificar um desequilíbrio na fase ou no grupo.
- . Transformadores de potencial ou transformadores de corrente entre os neutros de dois ou mais bancos de capacitores ligados em estrela



- isolada, os quais operarão com o desequilíbrio do banco.
- . Transformador de potencial ligado entre o neutro e a terra, em um banco com estrela isolada, para detectar o deslocamento de neutro.

1.2.1 - CONSIDERAÇÕES ACERCA DE FUSÍVEIS

A principal filosofia do uso dos fusíveis no banco de capacitores é a de que a unidade capacitiva defeituosa internamente seja retirada de operação o mais rápido possível, de modo a evitar maiores danos.

Para uma atuação correta do fusível, é recomendado que o mesmo seja atravessado por uma corrente de defeito não inferior a dez vezes a corrente nominal da unidade capacitiva.

As principais funções dos fusíveis individuais são:

- . Isolar o capacitor defeituoso, antes que possam ocorrer maiores danos, limitando e interrompendo a corrente de modo a impedir a decomposição do meio impregnante e o aparecimento de pressão anormal dentro do capacitor pela formação de arco.
- . Permitir a continuidade de serviço do banco de capacitores em caso de falha de uma unidade.
- . Permitir a identificação visual do capacitor defeituoso em um banco constituído de muitas unidades.
- . Indicar a presença de correntes anormais que poderão estar sendo causadas por condições de sobretensão ou por harmônicos, e que poderiam causar superaquecimento e por conseqüência a diminuição da vida útil do capacitor.

Devem ser considerados ao selecionar uma proteção de sobrecorrente das unidades capacitivas, utilizando fusíveis:

- . Corrente em regime permanente no fusível.
- . Transitório de corrente.
- . A corrente disponível de falta no banco de capacitores.
- . Seletividade da curva tempo-corrente do fusível com a curva de tempo da caixa da unidade capacitiva.
- . Tensão nas unidades restantes após falha em unidades capacitivas.
- . Descarga de energia das unidades capacitivas em paralelo.

Para unidades trifásicas ou monofásicas de baixa tensão (até 1000 [V]), os fusíveis devem ter alta capacidade de ruptura, retardados, do tipo NH ou diazed. Estes devem ser dimensionados para suportar 1,65 vezes a corrente nominal capacitiva.

Em alta tensão, normalmente são utilizados fusíveis do tipo expulsão, ou fusíveis limitadores de corrente. Estes devem suportar continuamente uma corrente de 1,25 vezes a corrente nominal do banco de capacitores com conexões delta ou neutro não aterrado e 1,35 vezes a corrente nominal do banco de capacitores com neutro aterrado.



1.2.2 - CONSIDERAÇÕES ACERCA DE RELÉS

Os relés para a proteção dos bancos de capacitores são usados em adição à proteção individual dos capacitores através do uso de fusíveis individuais ou de grupo.

A proteção do banco de capacitores como um todo contra sobretensões na linha de alimentação é feita por meio de relés convencionais de sobretensão.

Utilizam-se relés de desequilíbrio para proteger capacitores de um desequilíbrio originado pela exclusão de capacitores com defeito. Exclusão esta realizada pelos fusíveis individuais de proteção. Estes relés estão localizados no neutro dos bancos de capacitores, os quais são acionados através da corrente que circula pelo neutro, resultante de um desequilíbrio.

Relés de sobrecorrente são instalados na linha de alimentação dos bancos de capacitores para proteção contra defeitos entre fases ou entre fase-terra que possam ocorrer em barramentos de alimentação entre os disjuntores e o banco de capacitores, ou entre grupos série de fases diferentes do banco. O elemento instantâneo destes relés, não é utilizado nesta aplicação, pois o mesmo pode ser indevidamente operado pelas sobrecorrentes transitórias de energização.

Para proteger o banco de capacitores de sobretensões provenientes de descargas atmosféricas, impulsos de manobra ou sobretensões à frequência fundamental, usam-se os pára-raios, que atuam como limitadores de tensão, impedindo que tensões anormais alcancem o banco de capacitores.

Ocasionalmente, podem-se usar relés térmicos em adição aos outros tipos de proteção. Estes são usados para detectar condições anormais de temperatura, como no aparecimento de harmônicos no banco de capacitores.

1.3 - CONEXÕES DOS BANCOS DE CAPACITORES

Um dos estudos a ser feito quando da utilização de banco de capacitores é o tipo de conexão que este deverá ter. Como não há uma regra geral para escolha da conexão de banco de capacitores, serão mostrados apenas os tipos normalmente utilizados e as vantagens e desvantagens de cada tipo de conexão.

As conexões típicas usadas em bancos de capacitores são:

1.3.1 - CONEXÃO DELTA

A figura 7 mostra este tipo de conexão:

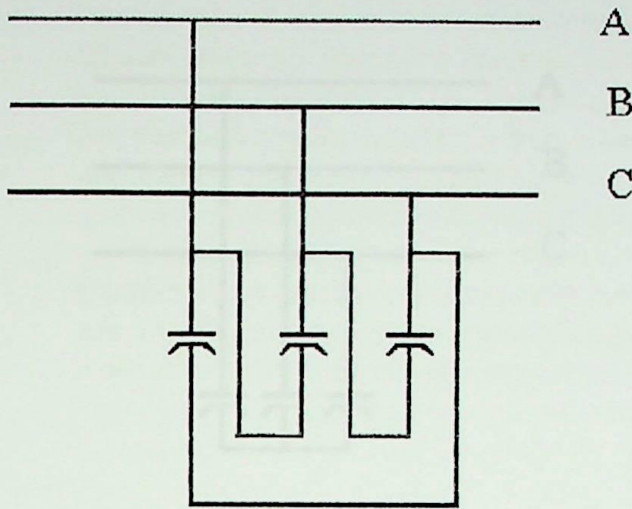
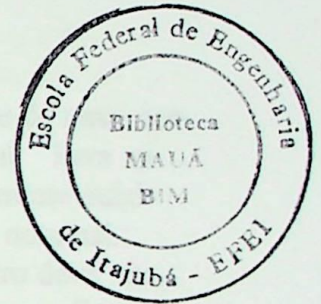


Figura 7: Conexão delta.



Vantagens:

- . Inexistência de harmônicos de terceira ordem.
- . Segurança na operação do fusível.

Desvantagens:

- . Em caso de se utilizar proteção diferencial, o custo da instalação aumenta substancialmente, tendo em vista a necessidade de um grande número de transformadores de corrente.
- . Em circuitos onde exista apenas um grupo série por fase e o banco de capacitores estiver próximo a subestações ou a outros bancos de capacitores, pode ser necessário utilizar fusíveis limitadores de corrente.

1.3.2 - CONEXÃO ESTRELA ISOLADA

A figura 8 mostra este tipo de conexão:

Vantagens:

- . O banco de capacitores com esta conexão é insensível aos harmônicos de corrente de terceira ordem e múltiplos.
- . Evita o fluxo de corrente de desequilíbrio, que em sistemas com neutro aterrado, pode sensibilizar o relé de proteção de terra.

Desvantagens:

- . Caso haja um curto-circuito em uma das fases onde o banco de capacitores esteja instalado, haverá sobretensão nas fases "sãs", podendo vir a danificar equipamentos ligados no mesmo barramento que o banco.

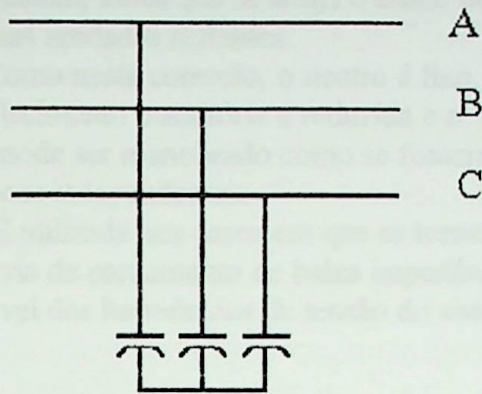


Figura 8: Conexão Estrela isolada.

- Para uma atuação correta do fusível, necessita-se de uma corrente da ordem de dez vezes a corrente nominal. Para os bancos de capacitores com estrela isolada, a corrente máxima de falta é da ordem de três vezes a corrente nominal.
- Por precaução contra surtos de manobra, o neutro deve ser isolado para a tensão fase-fase. Isto pode se tornar dispendioso em tensões mais elevadas.

1.3.3 -CONEXÃO ESTRELA ATERRADA

A figura 9 mostra este tipo de conexão:

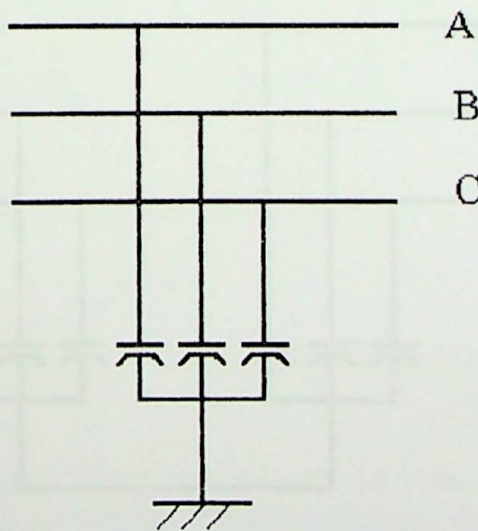


Figura 9: Conexão Estrela aterrada.

Vantagens:

Bancos de capacitores ligados nesta conexão fornecem um caminho de escoamento de baixa impedância para as corren-



- tes de descargas atmosféricas.
- . Esta conexão permite que um número maior de capacitores falhem, antes que se atinja o limite de 10% de sobretensão nas unidades restantes.
- . Como nesta conexão, o neutro é fixo, a tensão de reestabelecimento transitória é reduzida e o banco de capacitores pode ser manobrado como se fossem três bancos monofásicos independentes.
- . É utilizada nos casos em que se tornar necessário obter uma via de escoamento de baixa impedância para o controle do nível dos harmônicos de tensão do sistema.

Desvantagens:

- . Em circuitos onde exista apenas um grupo série por fase, e o banco de capacitores estiver próximo a subestações ou a outros bancos de capacitores, pode ser necessário utilizar fusíveis limitadores de corrente.
- . Os relés de neutro devem possuir filtros contra harmônicos de terceira ordem.
- . Pode haver interferência em circuitos de comunicação, em virtude do fluxo de harmônicos de terceira ordem à terra.

1.3.4 - CONEXÃO DUPLA ESTRELA ISOLADA:

A figura 10 mostra este tipo de conexão:

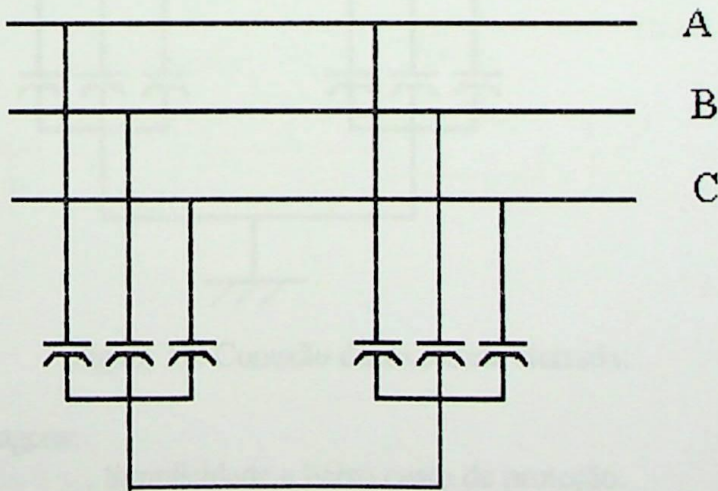


Figura 10 - Conexão dupla estrela isolada.

Vantagens:

- . Não há via de escoamento de harmônicos de corrente de



terceira ordem e múltiplos.

- . Os distúrbios do sistema não se transmitem ao circuito de proteção do banco de capacitores.
- . Baixo custo do banco de capacitores, principalmente no que diz respeito à proteção.

Desvantagens:

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

1.3.5 - CONEXÃO DUPLA ESTRELA ATERRADA:

A figura 11 mostra este tipo de conexão:

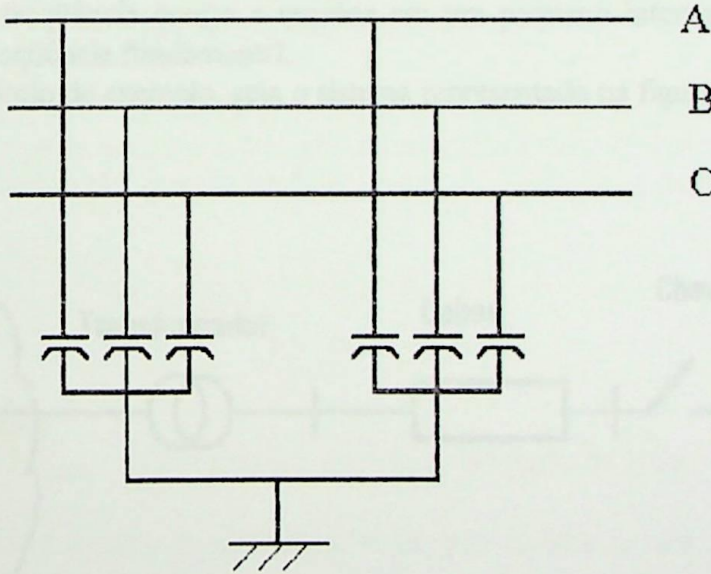


Figura 11: Conexão dupla estrela aterrada:

Vantagens:

- . Simplicidade e baixo custo de proteção.
- . Fornecem uma via de escoamento de baixa impedância para as correntes de descargas atmosféricas.
- . Fornece caminho em baixa impedância para o controle do nível dos harmônicos de tensão do sistema.

Desvantagens:

- . Pode haver interferência em circuitos de comunicação.



- . Os relés devem ser filtrados contra harmônicos de terceira ordem.

Em baixa tensão (até 1000 [Volts]) é normalmente utilizada a conexão delta.

A escolha do tipo de conexão a ser utilizada em bancos de capacitores com tensões acima de 1000 [Volts], depende da configuração do sistema, se aterrado ou não. Assim sendo, o banco de capacitores só deverá ser aterrado quando instalado em sistemas efetivamente aterrados.

Em média tensão, os sistemas são geralmente isolados, logo, deve-se projetar banco de capacitores com neutro isolado neste nível de tensão.

Em níveis de tensão acima de 69 [kV], utiliza-se para bancos de capacitores a conexão estrela aterrada, devido à tensão de restabelecimento e a reignição de arco.

1.4 - CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES

Conforme mostrado através de simples exemplos no item 1.1.1, no momento da energização de um banco de capacitores, circulam através deste uma corrente elevada, oscilatória e de curta duração. Grosso modo, pode-se dizer que um capacitor no momento de sua energização comporta-se como um curto-circuito, e portanto, a corrente circulante nestes instantes é limitada apenas pela impedância da fonte e pelos cabos de alimentação existentes entre a fonte e o banco de capacitores. A parcela de maior amplitude desta corrente transitória de alta frequência ocorre e termina em um pequeno intervalo de tempo, menor que um ciclo da frequência fundamental.

A título de exemplo, seja o sistema representado na figura 12.

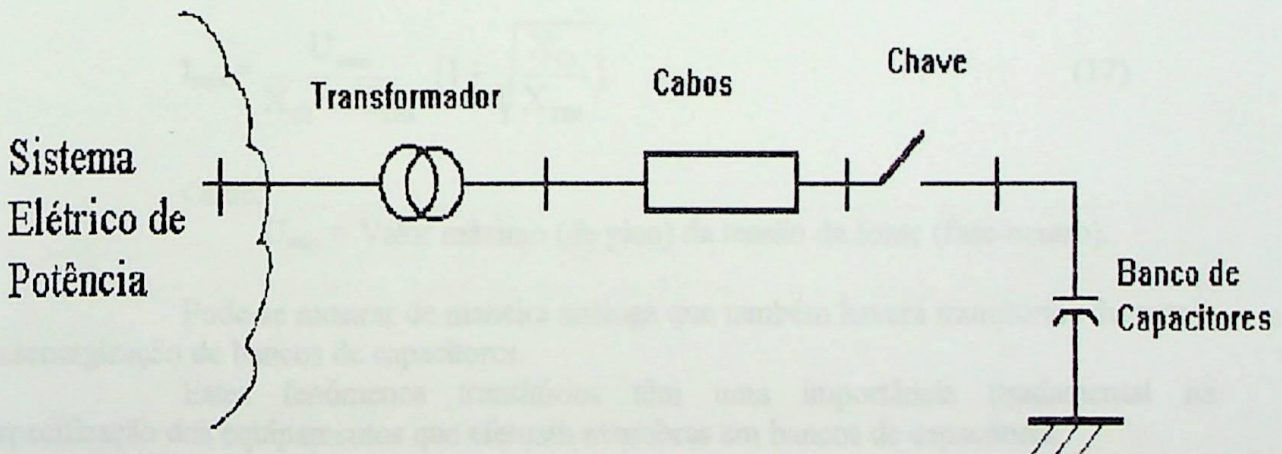


Figura 12: Representação unifilar da energização de um banco de capacitores.

13. Para se realizar a análise, utiliza-se o circuito equivalente mostrado na figura

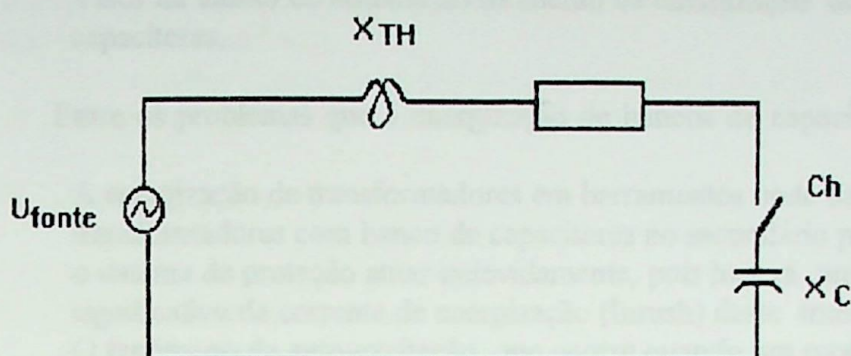


Figura 13: Circuito equivalente.

Onde:

U_{fonte} = Tensão da fonte.

X_{TH} = Reatância equivalente de Thevenin à frequência fundamental no ponto de instalação do banco de capacitores.

R_{TH} = Resistência equivalente de Thevenin à frequência fundamental no ponto de instalação do banco de capacitores.

X_{C1} = Reatância capacitiva do banco de capacitores à frequência fundamental.

Desprezando R_{TH} face a X_{TH} , pode-se mostrar através de uma análise semelhante à que foi feita no item 1.1.1, que a máxima corrente de energização do banco de capacitores (corrente I_{rush}) quando do fechamento da chave ch é dada por:

$$I_{\text{máx}} = \frac{U_{\text{máx}}}{X_{\text{C1}} - X_{\text{TH}}} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{X_{\text{C1}}}{X_{\text{TH}}}} \right] \quad (17)$$

Onde:

$U_{\text{máx}}$ = Valor máximo (de pico) da tensão da fonte (fase-neutro).

Pode-se mostrar de maneira análoga que também haverá transitórios durante a descargização de bancos de capacitores.

Estes fenômenos transitórios têm uma importância fundamental na especificação dos equipamentos que efetuam manobras em bancos de capacitores.

Os principais fatores que influem na magnitude e na frequência dos transitórios envolvidos durante o chaveamento dos bancos de capacitores são:

- . Tensão de operação.
- . Potência do banco de capacitores.
- . Capacitância do banco de capacitores e indutância da linha entre a fonte e o banco de capacitores.
- . Presença de mais de um banco de capacitores na mesma barra.



- . Valor da tensão do sistema no momento da energização do banco de capacitores.

Entre os problemas que a energização de bancos de capacitores pode causar estão:

- . A energização de transformadores em barramentos onde hajam outros transformadores com banco de capacitores no secundário pode fazer o sistema de proteção atuar indevidamente, pois haverá um aumento significativo da corrente de energização (Inrush) deste transformador.
- . O fenômeno da auto-excitação, que ocorre quando um motor instalado junto de um banco de capacitores é desligado. Isto ocorre devido à inércia do motor torná-lo durante o instante de seu desligamento um gerador. Isto, juntamente com a energia remanescente do banco de capacitores, poderá fazer com que haja uma ressonância entre os efeitos indutivos que ocorrem no motor e o banco de capacitores.

Conclui-se então, que os contatos das chaves de manobra, ao ligar ou desligar um banco de capacitores são extremamente solicitados. Portanto, estas chaves devem ser dimensionadas segundo o critério da máxima corrente. O fechamento dos contatos destas chaves devem ser o mais simultâneo possível de modo a evitar formação de arco que provoca a redução da vida útil das mesmas.

Os bancos de capacitores em baixa tensão (até 1000 [V]) podem ser manobrados basicamente através de contadores, chave seccionadora e disjuntores termomagnéticos.

Acima de 1000 [V], os bancos de capacitores são normalmente chaveados por disjuntores dos tipos:

- . a óleo
- . a SF₆
- . a seco
- . a vácuo.

Conclui-se que os equipamentos de manobra de banco de capacitores devem ter uma corrente nominal acima da corrente nominal do banco de capacitores e devem suportar a corrente transitória, tanto na energização como na desenergização do banco de capacitores.

1.5 - ESPECIFICAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Sendo a função básica de um banco de capacitores suprir potência reativa, esta deve ser a sua especificação principal. Além disto, especificam-se a tensão e a frequência.

Convém ressaltar que a potência reativa fornecida por um banco de capacitores é diretamente proporcional à frequência e ao quadrado da tensão. Assim, por exemplo um capacitor de 100[kVAr], 7620[V], 60 [Hz] fornecerá 90 [kVAr] quando submetido a uma tensão de 7320 [V], 60 [Hz], assim como fornecerá 83.3 [kVAr], quando



submetido a uma tensão de 7620 [V], 50[Hz]. A corrente por outro lado, é diretamente proporcional à tensão e à frequência.

Cada unidade capacitiva é provida de uma placa de identificação, à qual se deve fornecer as seguintes indicações mínimas:

- . Nome do fabricante.
- . Número de série e número de fabricação.
- . Potência nominal (em [kVAr]).
- . Número de fases.
- . Tensão nominal.
- . Frequência nominal.
- . Nível de isolamento.
- . Indicação de que o líquido isolante seja inflamável ou não.
- . Capacitância.
- . Categoria de temperatura.
- . Norma vigente.
- . Massa em [kG].
- . A inscrição “Contém fusíveis internos”, quando aplicável.

1.6 - PRINCIPAIS ENSAIOS DOS BANCOS DE CAPACITORES

Serão descritos, de forma bem resumida os principais ensaios previstos nas normas brasileiras envolvendo bancos de capacitores. Estes ensaios são divididos em dois tipos básicos que são os ensaios de rotina e os ensaios de tipo.

1.6.1 - ENSAIOS DE ROTINA

Estes ensaios devem ser realizados pelo fabricante que deve fornecer os relatórios sobre os mesmos. O comprador pode designar um inspetor para assisti-los. Entre os principais ensaios estão:

a) Ensaio para medição de capacitância:

Tem por objetivo medir a capacitância de cada unidade capacitiva, a fim de verificar se a potência reativa está dentro da tolerância especificada.

b) Ensaio para medição do ângulo de perdas:

Medem-se as perdas ativas, para, com a relação P_w/Q_w mostrada no item 1.5, poder se calcular o ângulo de perdas.

c) Ensaio de tensão aplicada:

Este ensaio tem por objetivo verificar o isolamento do capacitor, que deve ser capaz de suportar sem ocorrer nenhuma perfuração ou descarga, durante um certo intervalo de tempo à determinadas tensões entre terminais e entre os terminais interligados e a caixa.



d) Ensaio de estanqueidade:

Neste ensaio, o capacitor é submetido a aquecimento em estufa, a fim de se verificar, com a dilatação térmica do líquido impregnante, se não há vazamentos.

e) Ensaio do dispositivo de descarga:

Este ensaio tem por objetivo verificar os tempos estabelecidos para a descarga do capacitor. Deve ser realizado após o ensaio de tensão aplicada.

1.6.2 - ENSAIOS DE TIPO

Se o capacitor for aprovado nos ensaios de rotina, é submetido aos ensaios de tipo, que têm por objetivo verificar se o projeto dos capacitores atendem as características especificadas. Estes tipos de ensaios são de responsabilidade do fabricante e podem ser feitos através de amostras de unidades capacitivas.

a) Ensaio de estabilidade térmica:

Tem por objetivo, determinar o comportamento do capacitor em condições de operação adversas. Para isto, a unidade capacitiva é submetida a determinadas condições de temperatura e ventilação.

b) Ensaio do fator de perdas a temperaturas elevadas:

Este ensaio é feito logo após o de estabilidade térmica. Tem por objetivo medir o fator de perdas ao final do ensaio de estabilidade térmica. O valor medido não deve exceder ao que foi combinado entre o fabricante e o comprador.

c) Ensaio de tensão aplicada:

Durante este ensaio, não pode ocorrer perfuração da isolação ou descarga disruptiva externa. É feito em todas as unidades capacitivas que tenham seus terminais isolados da caixa.

As unidades capacitivas devem suportar durante 1 minuto uma tensão alternada aplicada entre os terminais de linha e a caixa, de valor correspondente à sua isolação.

O ensaio deve ser a seco para unidades de uso interno e sob chuva artificial para unidades de uso externo.

d) Ensaio de impulso:

Este ensaio é feito apenas para as unidades previstas para instalação exposta ao tempo.

O objetivo é comprovar a isolação da unidade capacitiva através da aplicação de uma ou mais ondas de impulso de tensão normalizadas com referência ao isolamento da unidade.



e) Ensaio de descarga:

Este ensaio tem por objetivo verificar a atuação do dispositivo de descarga da unidade capacitiva. Para isto, o capacitor é carregado com tensão contínua e desligado, medindo-se o tempo de descarga.

f) Ensaio de ionização:

Este ensaio tem por objetivo comprovar o nível de ionização do dielétrico da unidade capacitiva quando submetidos a várias aplicações de tensão.

g) Ensaio de Rádio-Ruído:

Tem por objetivo medir a tensão de rádio-interferência, quando o capacitor é submetido às tensões de especificação.

Esta tensão de rádio-interferência não deve ultrapassar os limites estabelecidos em norma.

h) Ensaio de rigidez dielétrica:

Tem por objetivo verificar a rigidez dielétrica da unidade capacitiva. Para isto é aplicado durante dez minutos uma tensão contínua cujo valor depende da tensão nominal do capacitor.

2 - RESSONÂNCIA DEVIDO A HARMÔNICOS

Como as impedâncias de um sistema elétrico podem ser analisadas simplificadaamente como combinações série paralelo de resistências, indutâncias e capacitâncias, podem ocorrer daí dois problemas que são a ressonância série e a ressonância paralela.

2.1 - RESSONÂNCIA SÉRIE

A ressonância série pode acontecer quando há dois elementos em série no sistema, sendo um deles de natureza capacitiva e o outro de natureza indutiva. Suas reatâncias podem se combinar de modo que a reatância equivalente entre eles seja zero ou muito próximo.

Um exemplo disto é a instalação de um banco de capacitores no secundário de um transformador, conforme mostra a figura 14:

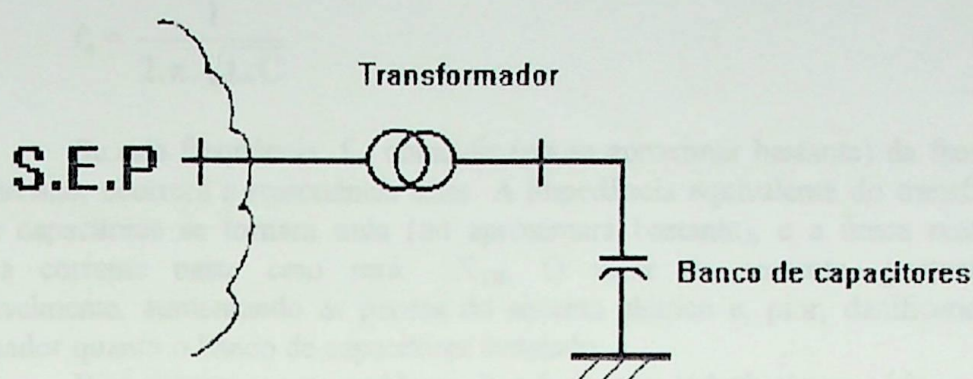


Figura 14: Caso de ressonância série.

O sistema da figura 14 pode ser representado através do diagrama de impedâncias mostrado na figura 15.

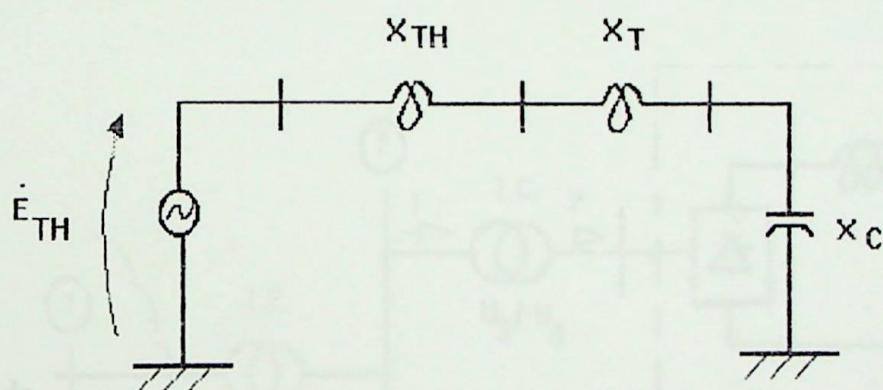


Figura 15 - Diagrama de impedâncias.

Onde:

E_{TH} - Tensão equivalente de Thevenin do sistema elétrico no ponto onde está instalado o transformador.

X_{TH} - Reatância equivalente de Thevenin do sistema elétrico no ponto onde está instalado o transformador.

X_T - Reatância indutiva representativa do transformador.

X_C - Reatância capacitiva representativa do banco de capacitores.

Pode ocorrer que:

$$X_T = X_C \quad (17)$$

A frequência onde isto ocorre será dado por:



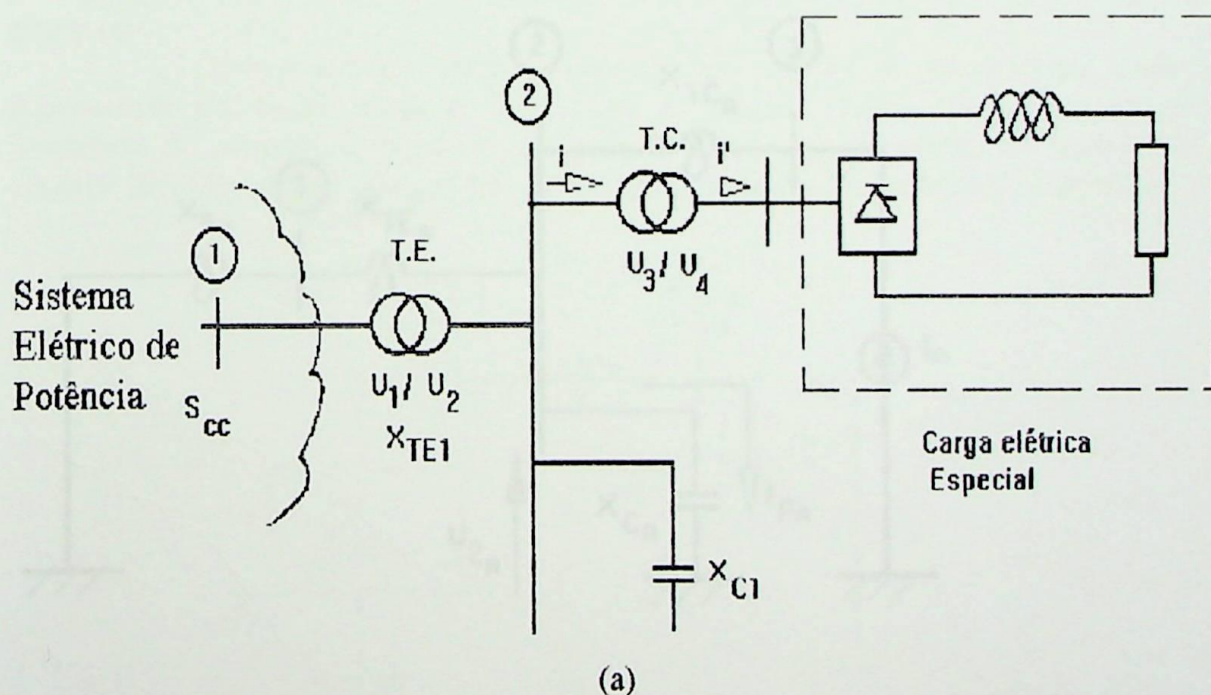
$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (18)$$

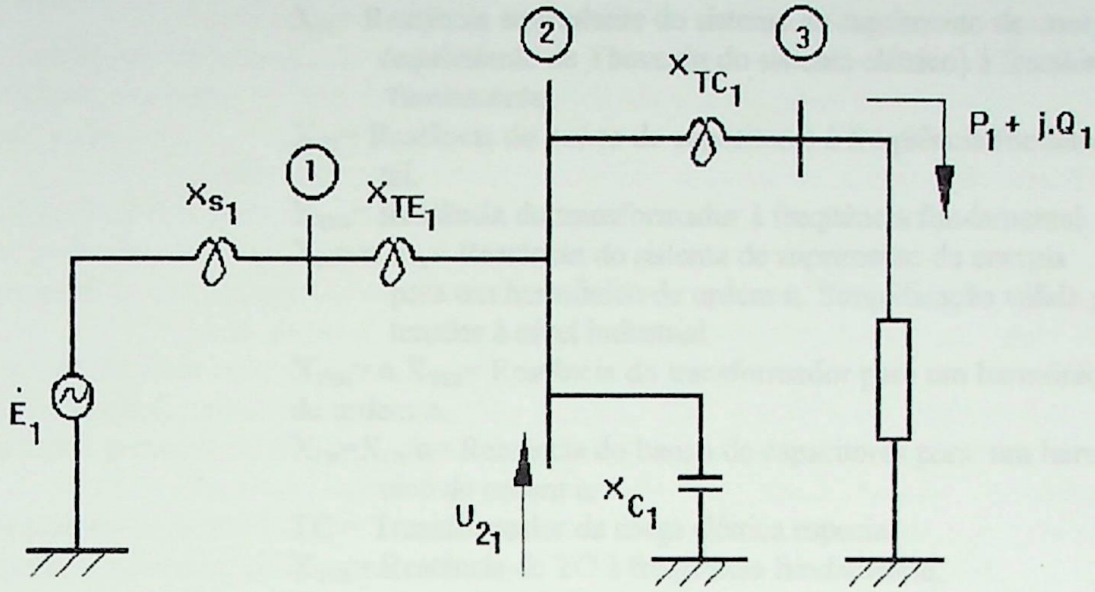
Se esta frequência f_n coincidir (ou se aproximar bastante) da frequência da fonte de tensão, ocorrerá a ressonância série. A impedância equivalente do transformador e banco de capacitores se tornará nula (ou aproximará bastante), e a única reatância que limitará a corrente neste caso será X_{TH} . O valor da corrente, portanto, subirá consideravelmente, aumentando as perdas do sistema elétrico e, pior, danificando tanto o transformador quanto o banco de capacitores instalado.

Para contornar este problema, instala-se uma indutância em série com o banco de capacitores de modo a alterar o valor da frequência de ressonância para um valor diferente da frequência da fonte.

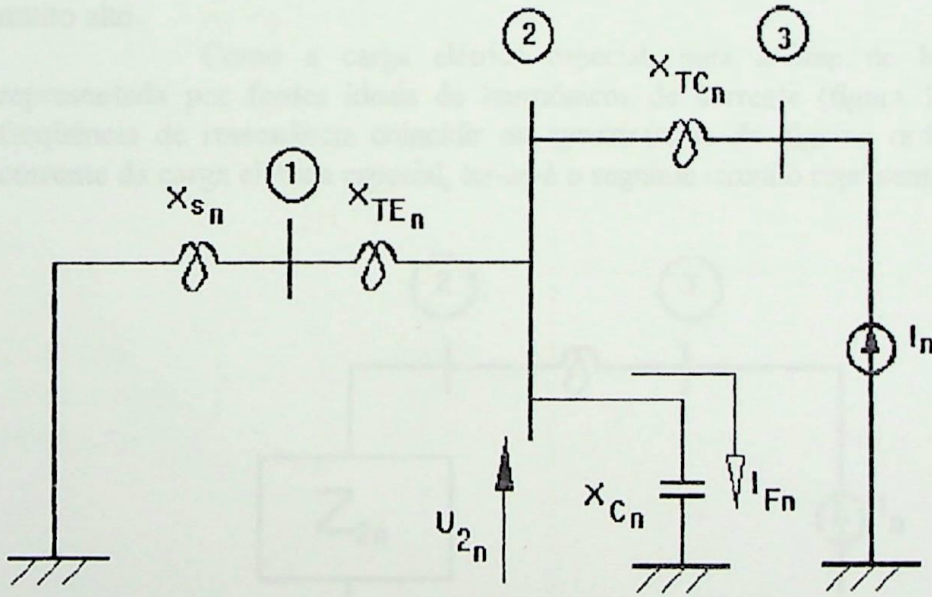
2.2 - RESSONÂNCIA PARALELA

A ressonância paralela ocorre quando há uma reatância de natureza capacitiva em paralelo com uma reatância de natureza indutiva, conforme mostra a figura 16 - a.





(b)



(c)

Figura 16 -

a- Diagrama unifilar

b- Circuito equivalente à frequência fundamental.

c - Circuito equivalente correspondente ao harmônico de ordem n.



Onde:

X_{s1} = Reatância equivalente do sistema de suprimento de energia (equivalente de Thevenin do sistema elétrico) à frequência fundamental.

X_{C1} = Reatância do banco de capacitores à frequência fundamental.

X_{TE1} = Reatância do transformador à frequência fundamental.

$X_{sn} = n \cdot X_{s1}$ = Reatância do sistema de suprimento de energia para um harmônico de ordem n . Simplificação válida para tensões à nível industrial.

$X_{TEn} = n \cdot X_{TE1}$ = Reatância do transformador para um harmônico de ordem n .

$X_{Cn} = X_{C1}/n$ = Reatância do banco de capacitores para um harmônico de ordem n .

TC = Transformador da carga elétrica especial.

X_{TC1} = Reatância de TC à frequência fundamental.

$X_{TCn} = n \cdot X_{TC1}$ = Reatância de TC para um harmônico de ordem n .

Se a reatância equivalente do sistema em série com a reatância do transformador ($X_{TH1} = X_{s1} + X_{TE1}$) entrar em ressonância paralela com a reatância X_{C1} do banco de capacitores, para um harmônico de ordem n , a impedância equivalente será de um valor muito alto.

Como a carga elétrica especial, para análise de harmônicos, pode ser representada por fontes ideais de harmônicos de corrente (figura 16-c), se a ordem da frequência de ressonância coincidir ou aproximar-se de alguma ordem de harmônico da corrente da carga elétrica especial, ter-se-á o seguinte circuito representativo da situação:

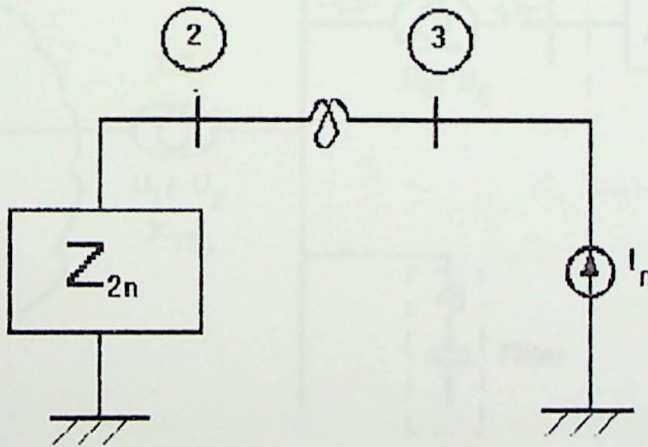


Figura 17-Impedância equivalente “vista da barra 2” para um harmônico de ordem n

Onde:

Z_{2n} = Impedância equivalente “vista da barra 2” para um harmônico de ordem n . Tem valor muito alto no caso de ressonância paralela.

Neste caso, a tensão na barra 2 terá um valor elevadíssimo, o que irá danificar o banco de capacitores. Nota-se que não é necessário o valor de I_n ser alto para este fenômeno ocorrer. A corrente pelo banco de capacitores será de um valor elevadíssimo, danificando-o.

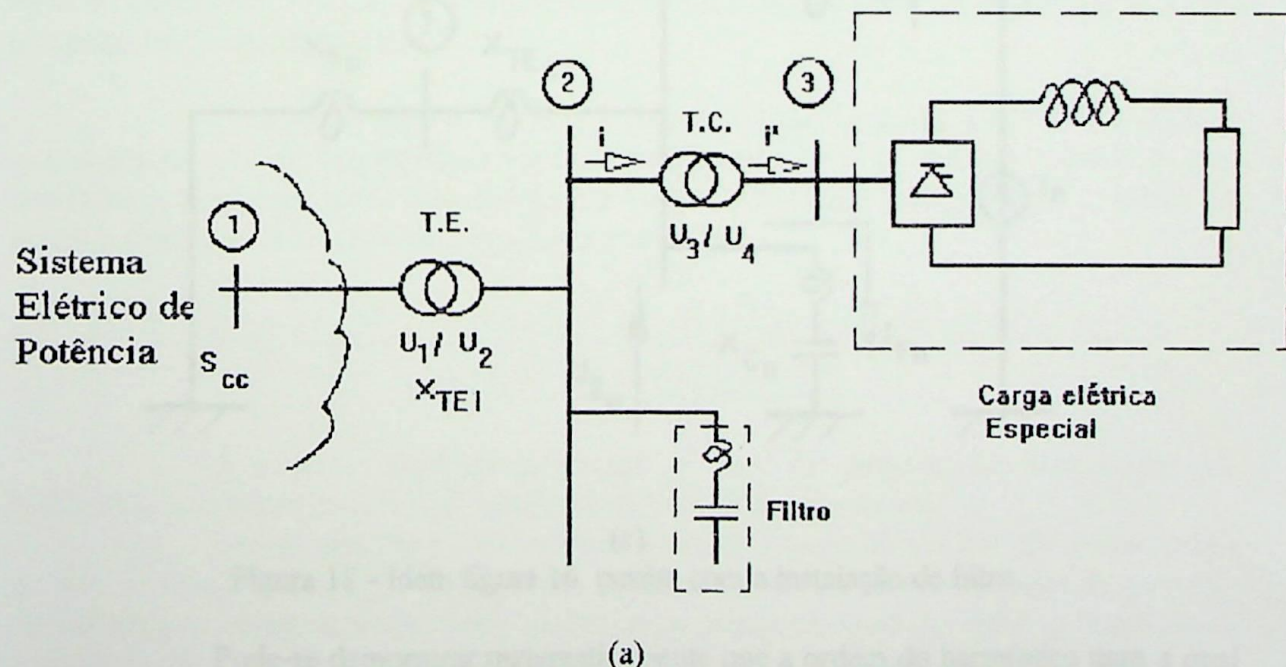
Assim, como mostrado no capítulo anterior, se o banco de capacitores está colocado com a intenção de melhorar o fator de potência, este além de piorar o próprio fator de potência da carga, ainda poderá ocasionar problema de ressonância paralela com os harmônicos de corrente provenientes da carga elétrica especial.

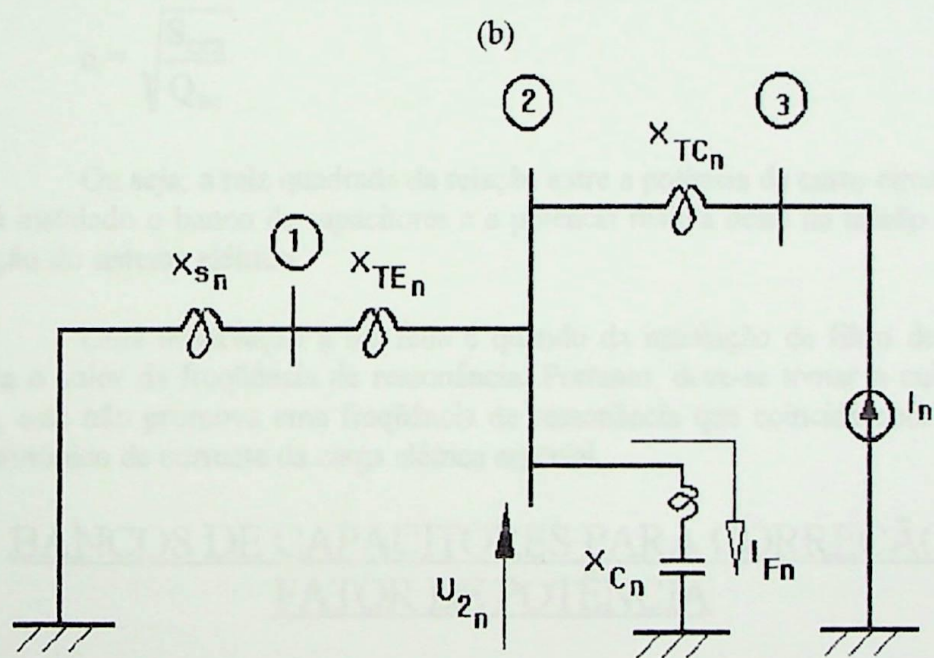
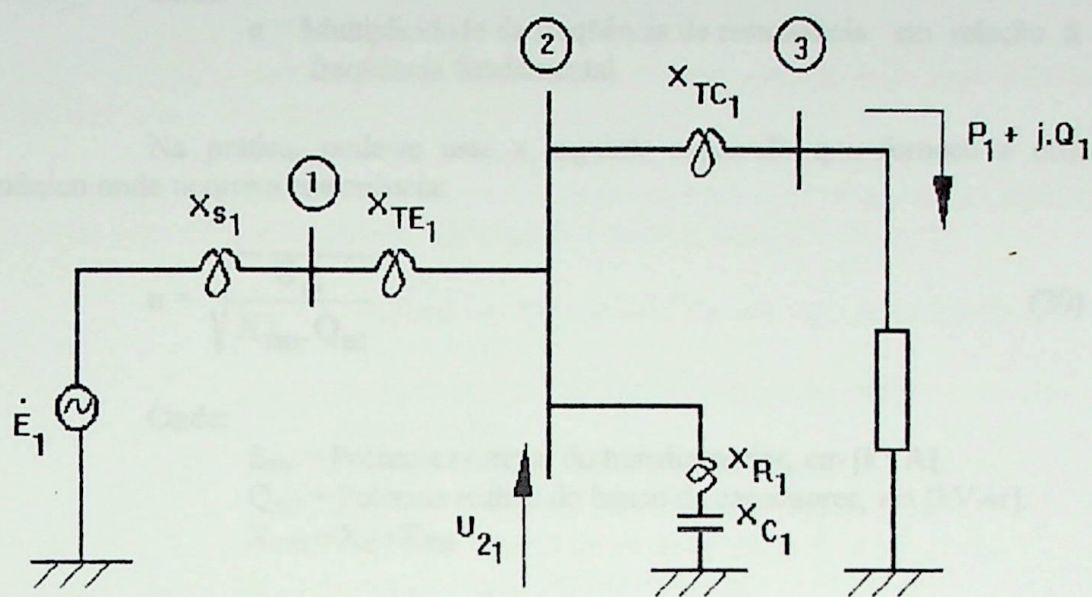
Uma maneira de se contornar este problema, como será visto adiante, é colocar em série com o banco de capacitores, uma indutância de modo a mudar a frequência de ressonância para um valor que não coincida com a ordem de nenhum harmônico de corrente proveniente da carga elétrica especial. Isto torna o banco de capacitores, um filtro.

Para não haver nenhum risco de ressonância paralela, providencia-se a instalação da indutância em série com o banco de capacitores, de modo que a frequência de ressonância não coincida com um múltiplo inteiro da frequência fundamental.

Na prática, usa-se promover uma ressonância série do filtro (banco de capacitores e indutância em série) para um valor de frequência entre 4,1 a 4,5 vezes a frequência fundamental. A razão disto é o fato da corrente de quinto harmônico da carga elétrica especial ser normalmente a de maior intensidade, podendo-se então absorver um pouco desta corrente, melhorando o fator de distorção de tensão da barra onde está instalado.

Assim, tem-se a figura 18:





(c)

Figura 18 - Idem figura 16, porém com a instalação de filtro.

Pode-se demonstrar matematicamente que a ordem do harmônico para a qual ocorre a ressonância paralela entre a impedância do banco de capacitores (X_{C1}) e a impedância do sistema da figura 16 ($X_{s1} + X_{TE1}$) é dada por:

$$n = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{s1} + X_{TE1}}} \quad (19)$$



Onde:

n = Multiplicidade da frequência de ressonância em relação à frequência fundamental.

Na prática, pode-se usar a seguinte expressão que fornece a ordem do harmônico onde ocorre a ressonância:

$$n = \sqrt{\frac{S_{IN}}{X_{TH1} \cdot Q_{BC}}} \quad (20)$$

Onde:

S_{TN} = Potência nominal do transformador, em [kVA].

Q_{BC} = Potência reativa do banco de capacitores, em [kVAr].

$X_{TH1} = X_{s1} + X_{TE1}$

De um modo mais simplificado, pode-se ainda usar a relação:

$$n = \sqrt{\frac{S_{CC2}}{Q_{BC}}} \quad (21)$$

Ou seja, a raiz quadrada da relação entre a potência de curto-circuito do ponto onde está instalado o banco de capacitores e a potência reativa deste na tensão e frequência de operação do sistema elétrico.

Uma observação a ser feita é quando da instalação de filtro de harmônico, este muda o valor da frequência de ressonância. Portanto, deve-se tomar o cuidado de, ao instalá-lo, este não promova uma frequência de ressonância que coincida com a ordem de algum harmônico de corrente da carga elétrica especial.

3 - BANCOS DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A maneira usual de se corrigir o fator de potência de uma carga que geralmente é indutiva, é através da instalação de bancos de capacitores.

Porém, conforme visto anteriormente, se a carga for do tipo não linear (carga elétrica especial), a instalação de banco de capacitores não apenas piora o fator de potência da instalação, como também pode provocar ressonância paralela entre a impedância equivalente de Thevenin do sistema elétrico e o banco de capacitores colocado. Neste caso, conforme será visto, não se usa para correção do fator de potência simplesmente o banco de capacitores, porém, usa-se este em série com uma indutância, obtendo-se o filtro.

Têm-se então dois casos para a correção do fator de potência, sendo estes quando há ou não a presença de harmônicos de corrente no sistema.

3.1 - CASO SEM HARMÔNICOS

Seja o sistema da figura 19, onde a carga elétrica é do tipo normal, por exemplo, um motor de indução:

Como a carga elétrica normal, assim como o transformador e o sistema elétrico, pode ser representada por uma resistência em série com uma indutância, tem-se o diagrama de impedâncias do sistema em questão mostrado na figura 20, onde:

R_{th} = Resistência equivalente de Thevenin representativa do sistema elétrico.

X_{th} = Reatância equivalente de Thevenin representativa do sistema elétrico.

R_T = Resistência representativa do transformador.

X_T = Reatância representativa do transformador.

R_C = Resistência representativa da carga.

X_C = Reatância representativa da carga.

U_2 = Tensão na carga, ou na barra 2.

$I_c = I_2$ = Corrente que flui pela carga.

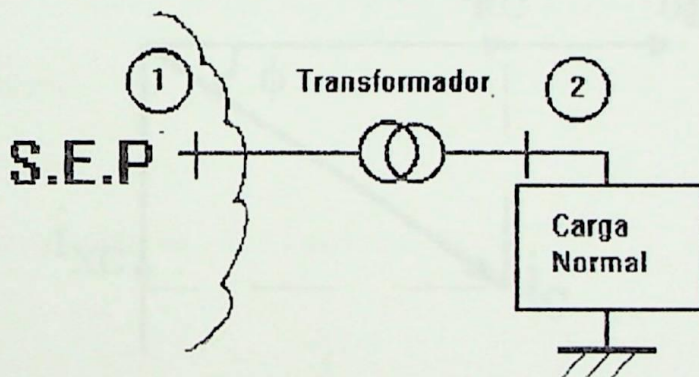


Figura 19 - Caso para a compensação do fator de potência sem a presença de harmônicos.

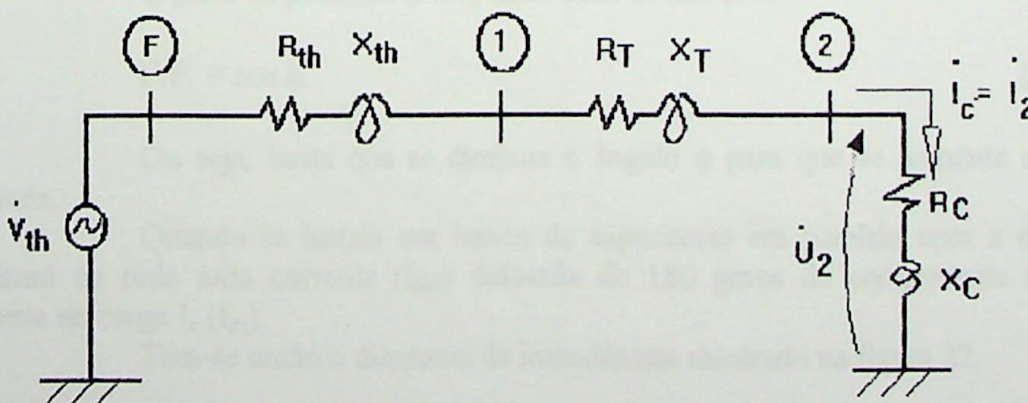


Figura 20 - Diagrama de impedâncias usado para a correção do fator de potência.



Conforme visto no capítulo anterior, o banco de capacitores para a correção do fator de potência pode ser instalado tanto na barra 1 (lado de alta do transformador) quanto na barra 2 (lado de baixa). Quando instalado na barra 1, pode-se considerar como impedância de carga, a composição série da impedância do transformador e da impedância de carga propriamente dita.

Para simplificação da análise e por ser o mais utilizado, será instalado o banco de capacitores no secundário do transformador (barra 2).

O fator de potência pode ser dado, neste caso pelo cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão da barra 2 (U_2) e a corrente que circula pela carga (I_c).

Como a carga é indutiva, o diagrama fasorial será da forma mostrada na figura 21, onde:

U_2 = Fasor representativo da tensão na barra 2.

I_c = Fasor representativo da corrente da carga.

ϕ = ângulo de defasagem entre a tensão U_2 e a corrente I_c .

I_{RC} = Componente ativa da corrente I_c .

I_{XC} = Componente reativa da corrente I_c .

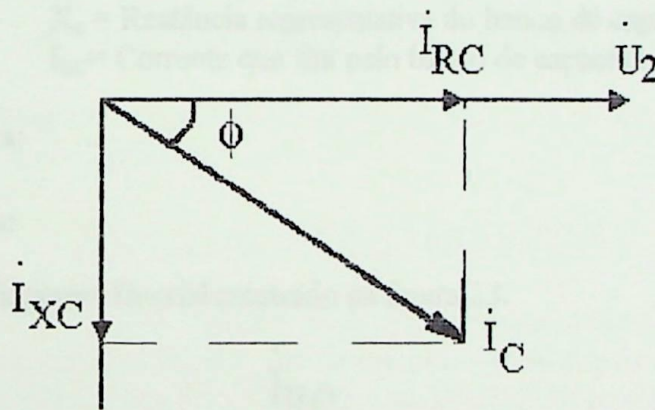


Figura 21 - Diagrama fasorial do circuito da figura 20.

O fator de potência (F.P.) neste caso é dado por:

$$\text{F.P.} = \cos \phi \quad (22)$$

Ou seja, basta que se diminua o ângulo ϕ para que se aumente o fator de potência.

Quando se instala um banco de capacitores em paralelo com a carga, este solicitará da rede uma corrente (I_{BC}) defasada de 180 graus da componente reativa da corrente de carga I_c (I_{xc}).

Tem-se então o diagrama de impedâncias mostrado na figura 22.

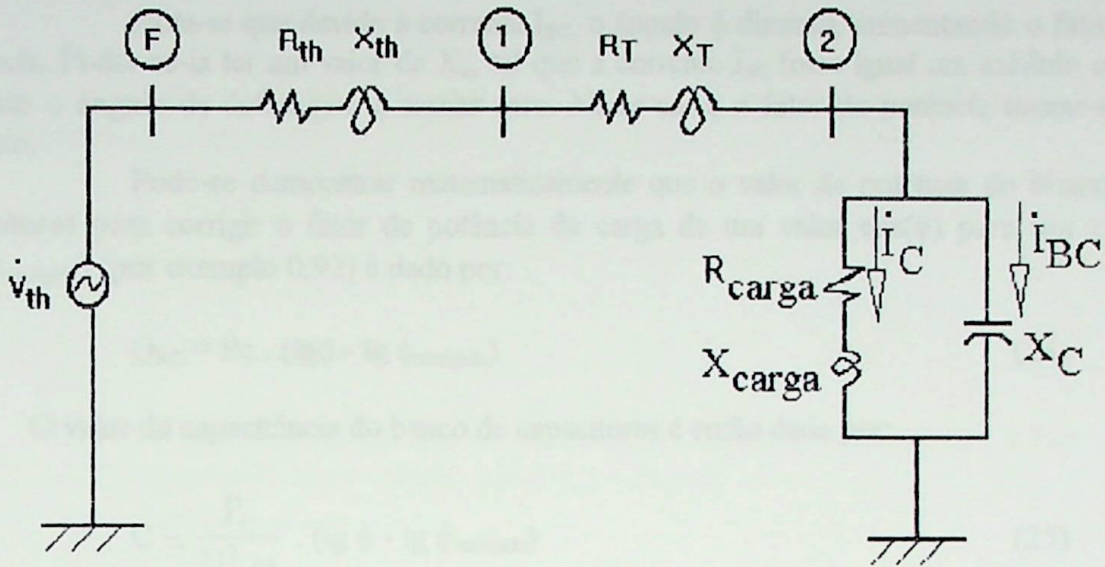


Figura 22 - Diagrama de impedâncias com o banco de capacitores.

Onde:

X_c = Reatância representativa do banco de capacitores.

I_{BC} = Corrente que flui pelo banco de capacitores.

Sendo agora:

$$I_2 = I_C + I_{BC} \quad (23)$$

Tem-se o diagrama fasorial mostrado na figura 23.

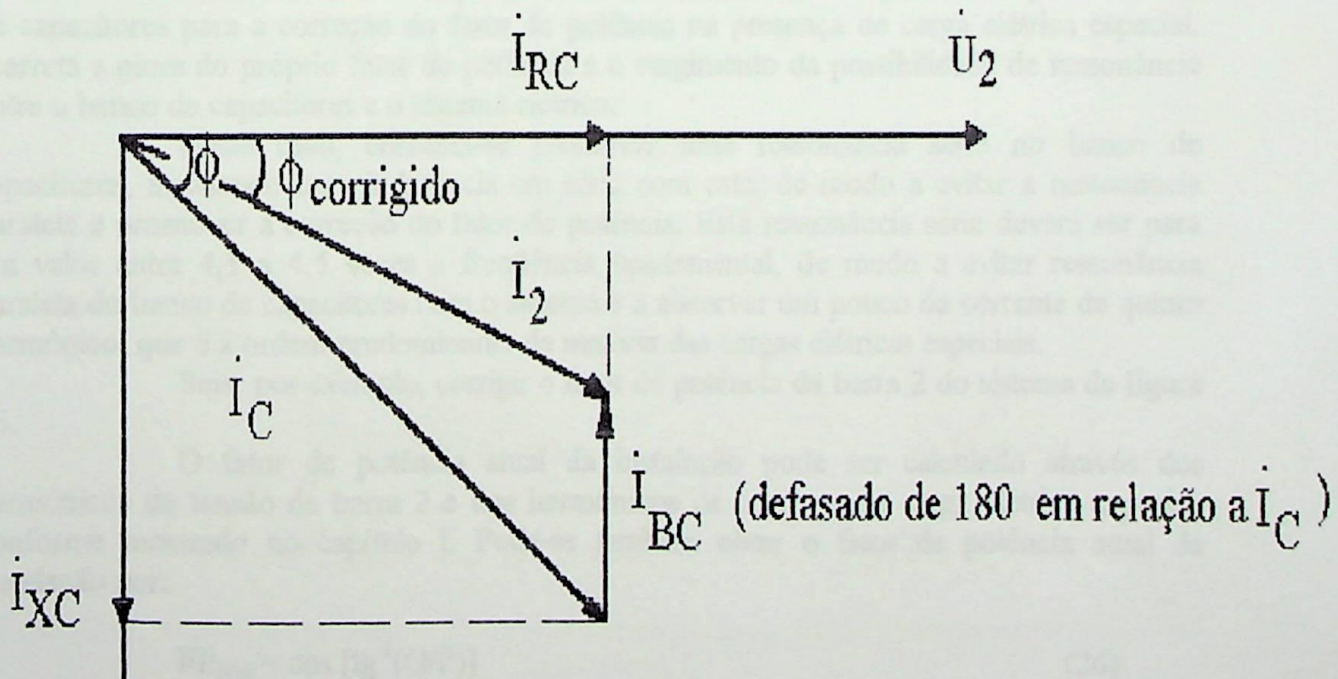


Figura 23 - Diagrama fasorial com o fator de potência corrigido.



Nota-se que devido à corrente I_{BC} , o ângulo ϕ diminui, aumentando o fator de potência. Poder-se-ia ter um valor de X_c , tal que a corrente I_{BC} fosse igual em módulo a I_{xc} , fazendo o ângulo de defasagem ϕ tornar zero. Neste caso, o fator de potência tornar-se-ia unitário.

Pode-se demonstrar matematicamente que o valor da potência do banco de capacitores para corrigir o fator de potência da carga de um valor $\cos(\phi)$ para um valor $\cos(\phi_{\text{corrigido}})$ (por exemplo 0,92) é dado por:

$$Q_{BC} = P_c \cdot (\text{tg}\phi - \text{tg}\phi_{\text{corrigido}}) \quad (24)$$

O valor da capacitância do banco de capacitores é então dada por:

$$C = \frac{P_c}{U_2^2 \cdot \omega} \cdot (\text{tg}\phi - \text{tg}\phi_{\text{corrigido}}) \quad (25)$$

Onde:

P_c = Potência ativa da carga.

U_2 = Valor eficaz da tensão da barra 2.

ω = Frequência angular da fonte de tensão.

Um exemplo prático da correção do fator de potência sem a presença de harmônicos será dado no capítulo 3.

3.2 - CASO COM HARMÔNICOS

Conforme dito no capítulo I e no item anterior, a simples instalação de banco de capacitores para a correção do fator de potência na presença de carga elétrica especial, acarreta a piora do próprio fator de potência e o surgimento da possibilidade de ressonância entre o banco de capacitores e o sistema elétrico.

Neste caso, costuma-se promover uma ressonância série no banco de capacitores, instalando uma indutância em série com este, de modo a evitar a ressonância paralela e promover a correção do fator de potência. Esta ressonância série deverá ser para um valor entre 4,1 a 4,5 vezes a frequência fundamental, de modo a evitar ressonância paralela do banco de capacitores com o sistema e a absorver um pouco da corrente de quinto harmônico, que é a ordem predominante da maioria das cargas elétricas especiais.

Seja, por exemplo, corrigir o fator de potência da barra 2 do sistema da figura 16.

O fator de potência atual da instalação pode ser calculado através dos harmônicos de tensão da barra 2 e dos harmônicos de corrente da carga elétrica especial, conforme mostrado no capítulo I. Pode-se também obter o fator de potência atual da instalação por:

$$FP_{\text{atual}} = \cos [\text{tg}^{-1}(Q/P)] \quad (26)$$

Onde:

Q = Potência reativa medida da carga elétrica especial.



P = Potência ativa medida da carga elétrica especial.

O filtro a ser instalado na barra 2 será do tipo mostrado na figura 24.
Conforme dito, tem-se:

$$X_{R1} = \frac{X_{C1}}{n^2} \quad (27)$$

Onde n varia entre 4,1 a 4,5.

Pode-se demonstrar que com a colocação de indutores em série, o banco de capacitores fica submetido a uma tensão maior que a da rede.

Assim:

$$U_{BC1} = a \cdot U_1 \quad (28)$$

Sendo:

$$a = \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (29)$$

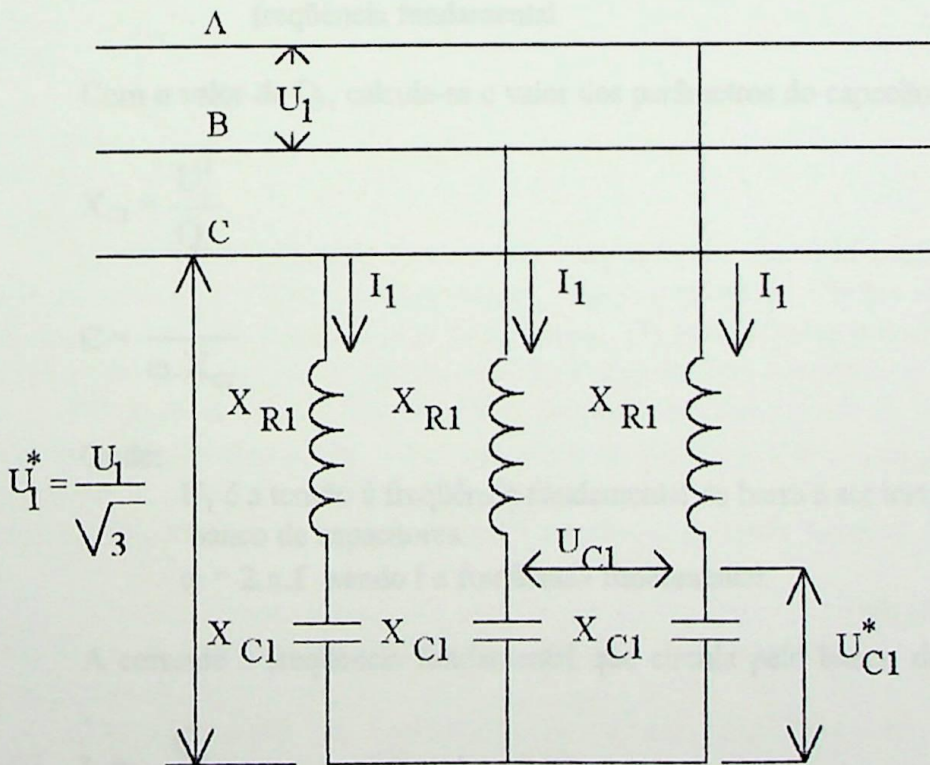


Figura 24 - Banco de capacitores (filtro) para correção do fator de potência na presença de harmônicos.

Onde:



U_1 = Tensão da rede à frequência fundamental.

U_{BC1} = Tensão “sobre” o banco de capacitores à frequência fundamental.

a = Fator pela qual a tensão no banco de capacitores é maior que a da rede.

Logo, não se pode especificar o banco de capacitores pela tensão nominal do sistema onde o mesmo está instalado, pois se assim o fizer, o banco de capacitores trabalhará com um nível de tensão acima do especificado, diminuindo sua vida útil.

3.2.1 - METODOLOGIA PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA:

Estando de posse do fator de potência atual (FP_{atual}) da barra 2 do sistema da figura 16, pode-se calcular a potência reativa do banco de capacitores para a correção do fator de potência a um valor desejado ($FP_{desejado}$) através da equação:

$$Q_1 = P \cdot [\text{tg}(\cos^{-1}(FP_{atual}) - \text{tg}(\cos^{-1}(FP_{desejado})))] \quad (30)$$

Onde:

P = Potência ativa da carga, a qual se quer corrigir o fator de potência.

Q_1 = Potência reativa necessária à correção do fator de potência à frequência fundamental.

Com o valor de Q_1 , calcula-se o valor dos parâmetros do capacitor através de:

$$X_{C1} = \frac{U_1^2}{Q_1} \quad (31)$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad (32)$$

Onde:

U_1 é a tensão à frequência fundamental da barra a ser instalada banco de capacitores.

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ sendo f a frequência fundamental.

A corrente à frequência fundamental que circula pelo banco de capacitores será:

$$I_1 = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot U_1} \quad (\text{em Ampéres}) \quad (33)$$

ou

$$I_1 = \frac{Q_1}{U_1} \quad (\text{em P.U.}) \quad (34)$$



Instala-se este banco de capacitores na barra 2 do sistema da figura 16 e executa-se o fluxo de harmônicos nestas condições, obtendo os valores dos harmônicos de corrente (I_2, I_3, \dots) que circulam pelo banco de capacitores.

Obtêm-se assim, com as equações 35 a 40 os parâmetros do filtro básico:

$$U_{BC} = a \cdot U_1 \cdot \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{n \cdot I_1} \right] \quad (35)$$

$$Q_{BC} = \frac{1}{a} \cdot Q_1 \cdot \left(\frac{U_{BC}}{U_1} \right)^2 \quad (36)$$

$$X_{C1} = \frac{U_{BC}^2}{Q_{BC}} \quad (37)$$

$$X_{R1} = \frac{X_{C1}}{n^2} \quad \text{onde } n \text{ está entre } 4,1 \text{ a } 4,5 \quad (38)$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} \quad (39)$$

$$L = \frac{X_{R1}}{\omega} \quad (40)$$

Substitui-se o banco de capacitores da barra 2 pelo filtro básico no sistema da figura 16 e executa-se o fluxo de harmônicos nestas condições. Obtêm-se assim, os harmônicos de corrente que circulam pelo filtro básico. De posse destes harmônicos e das equações (35) e (36), calculam-se os parâmetros U_{BC} e Q_{BC} do filtro nominal.

De posse de Q_{BC} e U_{BC} do filtro nominal, deve-se através de combinações série paralela de unidades capacitivas, obter um banco de capacitores de modo que a tensão nominal e a potência nominal sejam um pouco maiores que U_{BC} e Q_{BC} respectivamente. Têm-se assim os valores de U_{BCN} e Q_{BCN} , tensão nominal e potência nominal do banco de capacitores.

Com isto, encontram-se com as equações (37) a (40), os parâmetros do filtro. Executa-se o fluxo de harmônicos, obtendo-se os valores dos harmônicos de corrente que circulam pelo banco de capacitores.

Com os valores dos harmônicos de corrente pelo banco de capacitores, calcula-se U_{tctc} e Q_{tctc} pelas equações 41 e 42.

$$U_{tctc} = a \cdot U_1 \cdot \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{n \cdot I_1} \right] \quad (41)$$



$$Q_{\text{teste}} = \frac{1}{a} \cdot Q_{\text{BCN}} \cdot \left(\frac{U_{\text{BCN}}}{U_1} \right)^2 \quad (42)$$

Se U_{teste} e Q_{teste} ficarem abaixo dos valores de U_{BCN} e Q_{BCN} respectivamente, o procedimento está encerrado. Senão, deve-se aumentar U_{BCN} e/ou Q_{BCN} , fazer o mesmo procedimento anterior, até que U_{teste} e Q_{teste} estejam verificados.

Vale ressaltar que a instalação de filtros visando a correção do fator de potência melhora o fator de distorção da tensão na barra onde está instalado, embora não seja este o seu objetivo.

Dois exemplos de correção de fator de potência nestas condições será feito no próximo capítulo.

4 - FILTROS DE HARMÔNICOS

Têm por objetivo básico não deixar que os harmônicos de corrente provenientes de uma carga elétrica especial fluam para o sistema elétrico de potência causando os prejuízos já descritos no capítulo I. Para isto, os filtros devem fazer com que os fatores individuais e total de distorção de tensão da barra de acoplamento comum da carga com outros consumidores (no caso do sistema da figura 16, barra 2) estejam dentro de limites aceitáveis, ou seja, dentro de uma norma ou critério preestabelecido.

Os filtros podem ser classificados em função de sua localização, pelo modo de conexão ao sistema elétrico, pelo fator de qualidade (ou faixa de passagem), bem como o número e frequências de seus pontos de ressonância.

São normalmente localizados próximos às cargas elétricas especiais, podendo ser instalados tanto do lado de corrente alternada como pelo lado de corrente contínua no caso de conversores. Os filtros podem ser conectados no lado primário, secundário ou terciário (se houver) do transformador da carga.

4.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS

4.1.1 - TIPO SÉRIE

Este tipo de filtro é ligado em série com a carga, de modo a impedir que os harmônicos de corrente gerados por esta fluam para o sistema elétrico. A figura 25 ilustra este tipo.

Propicia ao harmônico de corrente para o qual está sintonizado, uma grande impedância, impedindo que este flua para o sistema elétrico.

É raríssimamente utilizado, pois deve ser dimensionado para suportar a corrente nominal da carga, o que torna o seu custo elevado.

4.1.2 - TIPO DERIVAÇÃO (SHUNT)

Este tipo de filtro é ligado, como mostra a figura 26, de modo a propiciar um caminho de baixa impedância para o harmônico de corrente ao qual está sintonizado.

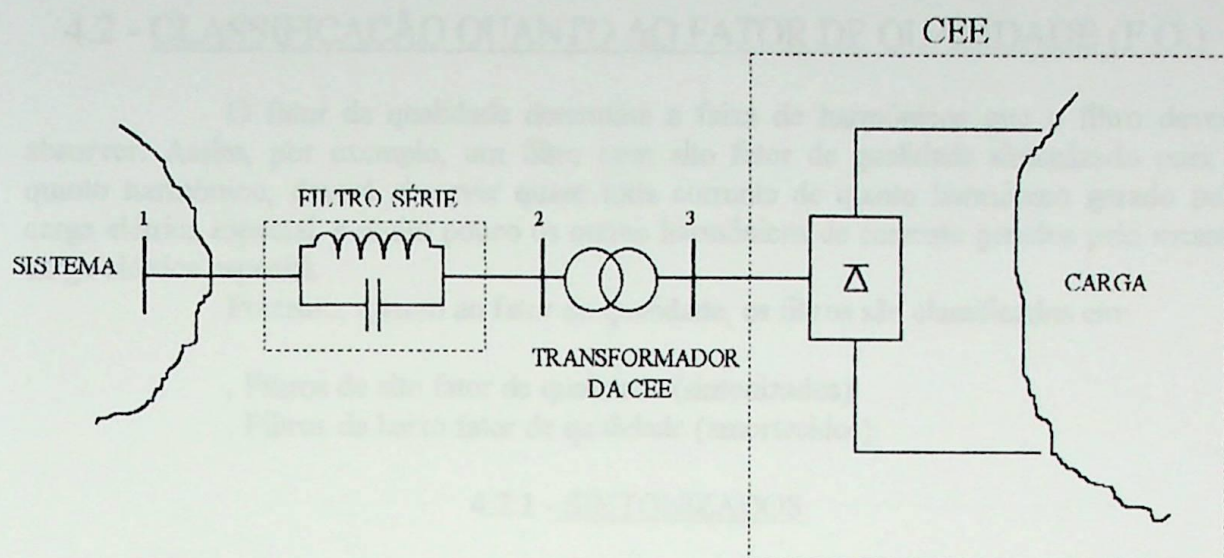


Figura 25 - Filtro tipo série.

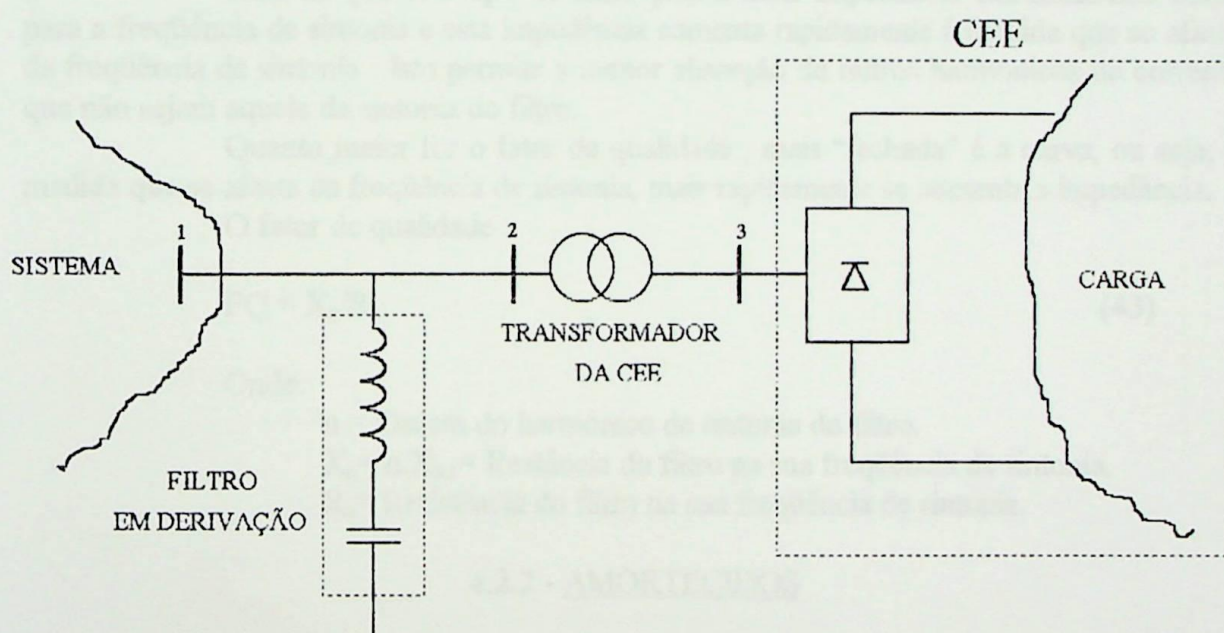


Figura 26 - Filtro tipo derivação.

Isto impede que o harmônico de corrente de sintonia flua para o sistema elétrico de potência.

A grande vantagem deste tipo em relação ao tipo série, é que este não precisa ser dimensionado para suportar a corrente nominal da carga. Outra vantagem do filtro tipo derivação é que este propicia uma melhora do fator de potência à instalação. Por estas razões, serão tratados daqui para frente, apenas filtros tipo derivação.

Os filtros podem ser conectados em delta, porém a conexão estrela ou estrela dupla são as mais utilizadas, pois propiciam um monitoramento de desequilíbrio através de um controle de tensão ou de corrente do neutro.



4.2 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO FATOR DE QUALIDADE (F.Q.)

O fator de qualidade determina a faixa de harmônicos que o filtro deverá absorver. Assim, por exemplo, um filtro com alto fator de qualidade sintonizado para o quinto harmônico, deverá absorver quase toda corrente de quinto harmônico gerado pela carga elétrica especial, e muito pouco os outros harmônicos de corrente gerados pela mesma carga elétrica especial.

Portanto, quanto ao fator de qualidade, os filtros são classificados em:

- . Filtros de alto fator de qualidade (sintonizados).
- . Filtros de baixo fator de qualidade (amortecidos).

4.2.1 - SINTONIZADOS

Estes tipos de filtros são normalmente utilizados para 5^o, 7^o, 11^o e 13^o harmônicos. A figura 27 mostra a representação deste tipo de filtro e como a sua impedância varia com a frequência.

Nota-se que este tipo de filtro possui uma impedância extremamente baixa para a frequência de sintonia e esta impedância aumenta rapidamente à medida que se afasta da frequência de sintonia. Isto permite a menor absorção de outros harmônicos de corrente que não sejam aquele da sintonia do filtro.

Quanto maior for o fator de qualidade, mais “fechada” é a curva, ou seja, à medida que se afasta da frequência de sintonia, mais rapidamente se aumenta a impedância.

O fator de qualidade :

$$FQ = X_n/R_n \quad (43)$$

Onde:

n = Ordem do harmônico de sintonia do filtro.

$X_n = n.X_{R1}$ = Reatância do filtro na sua frequência de sintonia.

R_n = Resistência do filtro na sua frequência de sintonia.

4.2.2 - AMORTECIDOS

São utilizados quando se deseja além de absorver harmônicos de corrente de sua sintonia, absorver outros harmônicos de corrente que estejam próximos à frequência de sintonia. Normalmente são utilizados para harmônicos de ordem acima de 17.

A representação deste tipo de filtro e como a sua impedância varia com a frequência estão mostrados na figura 28

Nota-se que este tipo possui uma impedância não tão baixa quanto a do tipo anterior, na frequência de sintonia. Além disto, à medida que se afasta da frequência de sintonia, a impedância do filtro não aumenta muito rapidamente. Isto permite que outros harmônicos de corrente, que não o da sintonia, sejam também absorvidos por este.

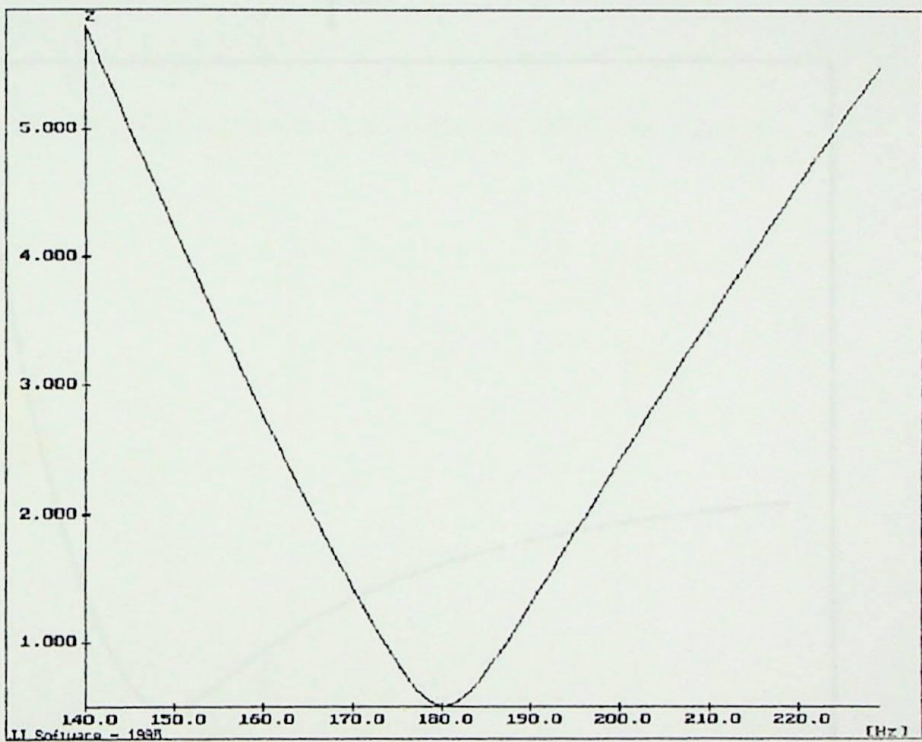
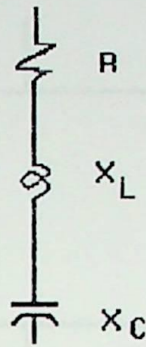


Figura 27 - Filtro tipo sintonizado.

O fator de qualidade deste tipo de filtro é dado por:

$$FQ = R_n / X_s \quad (44)$$

Sendo:

$$X_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (45)$$

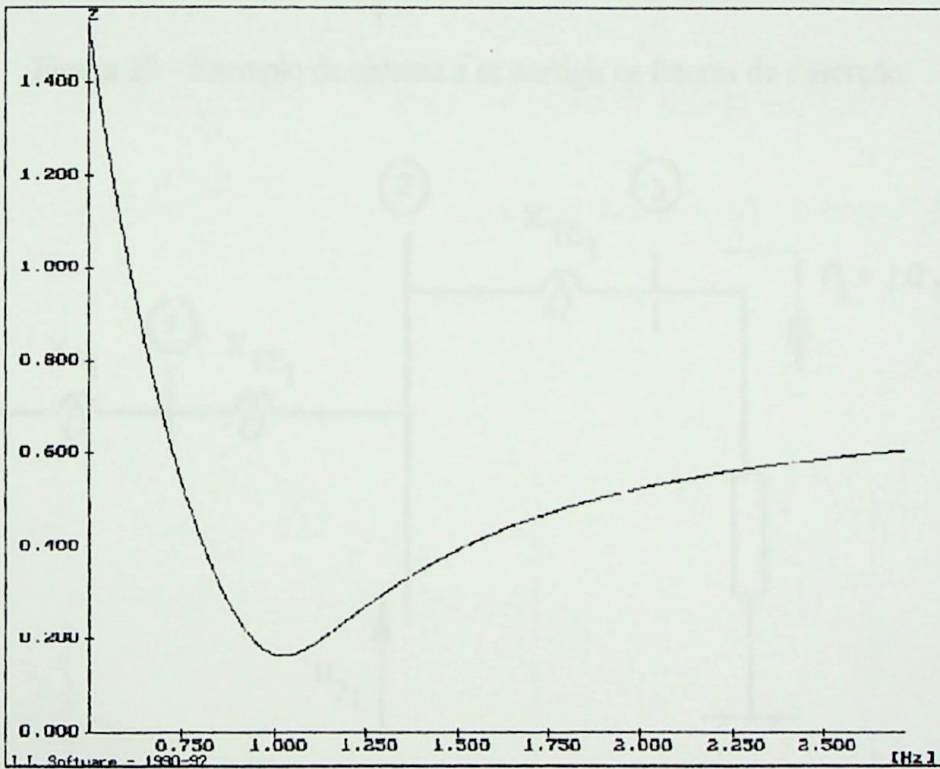
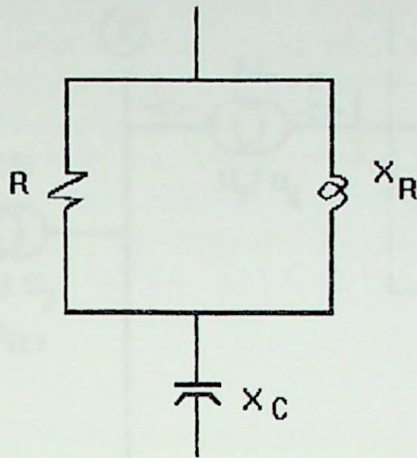


Figura 28 - Filtro tipo amortecido.

4.3 - PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DE FILTROS DE HARMÔNICOS

Seja por exemplo, verificar a necessidade de se instalar filtros no sistema da figura 29.

Sendo a barra 2, o ponto de acoplamento comum da carga elétrica especial com outros consumidores, devem-se verificar os fatores de distorção de tensão nesta barra.

Primeiramente deve-se obter o diagrama de impedâncias à frequência fundamental mostrada na figura 30.

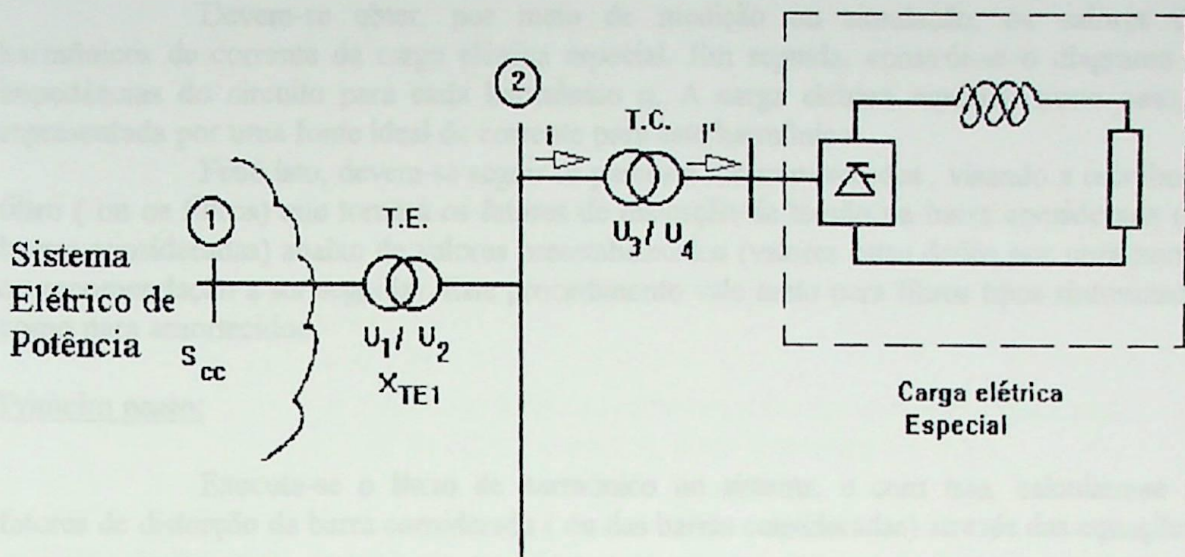


Figura 29 - Exemplo de sistema a se corrigir os fatores de distorção.

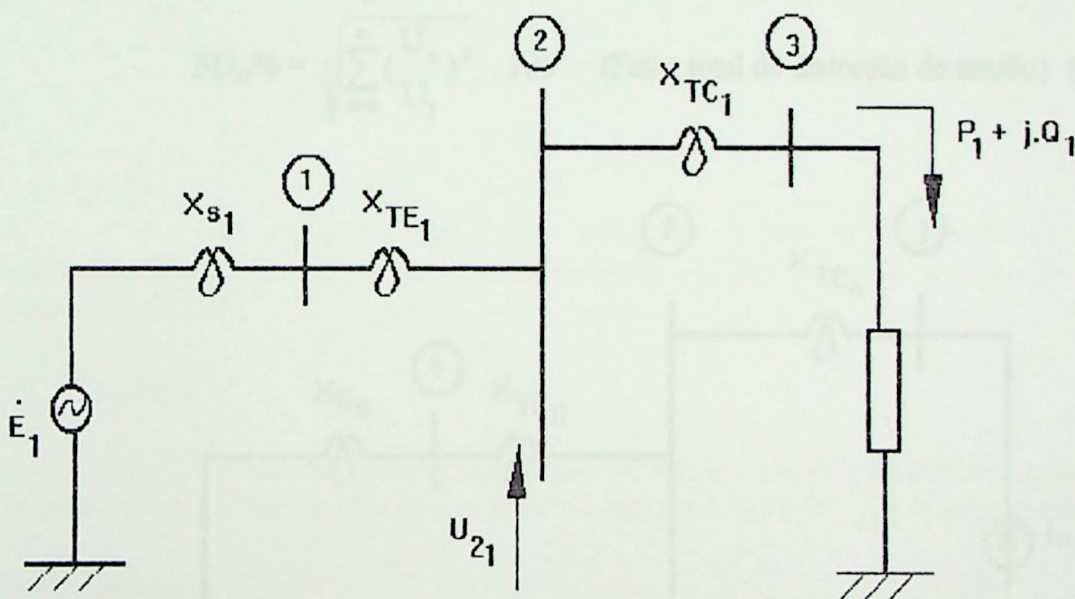


Figura 30 - Diagrama de impedâncias à frequência fundamental

Onde:

E_1 = Tensão equivalente de Thevenin.

X_{s1} = Impedância equivalente de Thevenin do sistema elétrico.

X_{TE1} = Impedância representativa do transformador TE.

X_{TC1} = Impedância representativa do transformador TC.

X_{TH1} = Impedância equivalente série do sistema elétrico e do transformador TE.

P_1 = Potência ativa consumida pela carga elétrica especial.

Q_1 = Potência reativa à frequência fundamental consumida pela carga elétrica especial.

Devem-se obter, por meio de medição ou simulação, os valores dos harmônicos de corrente da carga elétrica especial. Em seguida, constrói-se o diagrama de impedâncias do circuito para cada harmônico n . A carga elétrica especial, neste caso, é representada por uma fonte ideal de corrente para este harmônico.

Feito isto, devem-se seguir os passos a serem mostrados, visando a escolher o filtro (ou os filtros) que tornará os fatores de distorção de tensão na barra considerada (ou barras consideradas) abaixo de valores preestabelecidos (valores estes dados por uma norma ou recomendação a ser seguida). Este procedimento vale tanto para filtros tipos sintonizados como para amortecidos.

Primeiro passo:

Executa-se o fluxo de harmônico no sistema, e com isto, calculam-se os fatores de distorção da barra considerada (ou das barras consideradas) através das equações:

$$FD_{U_n}\% = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \quad (\text{Fatores individuais de distorção de tensão}) \quad (46)$$

$$FD_U\% = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \cdot 100 \quad (\text{Fator total de distorção de tensão}) \quad (47)$$

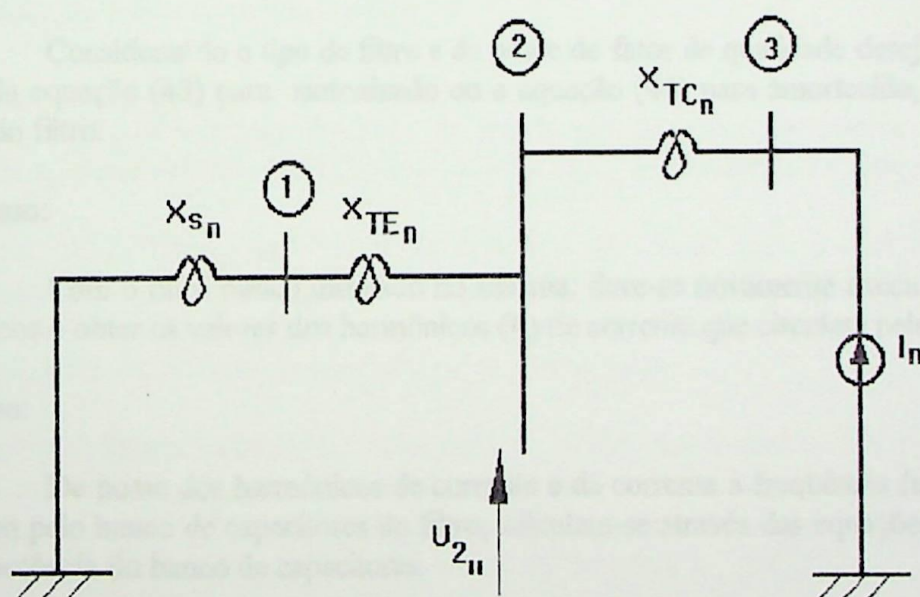


Figura 31 - Circuito equivalente para o harmônico de ordem n .

Segundo passo:

Tendo-se o valor do harmônico de corrente da carga elétrica especial (I_n) que provoca o maior fator de distorção de tensão e a barra onde se deseja instalar o filtro, calcula-se a potência reativa do filtro básico através da equação 48.



$$Q_1 = I_n \cdot U_1 \cdot a^2 \cdot \sqrt{\frac{3}{n \cdot (\xi^2 - a^2)}} \quad (48)$$

Onde:

I_n = Harmônico de corrente que provoca o maior fator de distorção de tensão.

U_1 = Tensão da barra onde se deseja instalar o banco de capacitores.

$$a = n^2 / (n^2 - 1)$$

ξ = Valor que define a potência reativa na frequência fundamental do filtro. Na prática, deve ficar entre 1,1 a 1,4.

Esta potência reativa (Q_1) é a potência mínima na frequência fundamental exigida pelo banco de capacitores para operar sem maiores problemas para um harmônico de ordem n .

Com o valor de Q_1 , calculam-se os parâmetros do filtro básico:

$$X_{C1} = \frac{U_{BC}^2}{Q_{BC}} \quad \text{onde } U_{BC} = \xi \cdot U_1 \quad (49)$$

$$Q_{BC} = Q_1$$

Considerando o tipo de filtro e de posse do fator de qualidade desejado, deve-se através da equação (43) para sintonizado ou a equação (44) para amortecido, calcular a resistência do filtro.

Terceiro passo:

Com o filtro básico instalado no sistema, deve-se novamente executar o fluxo de harmônicos e obter os valores dos harmônicos (I_n) de corrente que circulam pelo mesmo.

Quarto passo:

De posse dos harmônicos de corrente e da corrente à frequência fundamental que circulam pelo banco de capacitores do filtro, calculam-se através das equações abaixo, a tensão e a potência do banco de capacitores.

$$U_{BC} = a \cdot U_1 \cdot \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{n \cdot I_1} \right] \quad (51)$$

$$Q_{BC} = 3 \cdot X_{C1} \cdot [I_1^2 + \sum \frac{I_n^2}{n}] \quad (\text{para valores em [Var]}) \quad (52)$$

$$Q_{BC} = X_{C1} \cdot [I_1^2 + \frac{I_n^2}{n}] \quad (\text{para valores em [P.U.]}) \quad (53)$$



Através da combinação série paralelo de unidades capacitivas, deve-se obter um banco de capacitores com valores de tensão nominal (U_{BCN}) e potência nominal (Q_{BCN}) um pouco maiores que os valores calculados U_{BC} e Q_{BC} respectivamente. Com isto, tem-se o filtro nominal e seus parâmetros são calculados por:

$$X_{CI} = \frac{U_{BCN}^2}{Q_{BCN}} \quad (54)$$

$$X_{RI} = 1,03 \cdot X_{CI}/n^2 \quad \text{ou} \quad X_{RI} = 0,97 \cdot X_{CI}/n^2 \quad (55)$$

De posse do fator de qualidade a ser usado e da equação 43 (se for tipo sintonizado) ou da equação 44 (se for tipo amortecido), deve-se calcular a resistência usada no filtro.

Com o filtro nominal instalado no sistema e com o fluxo de harmônicos executado, calculam-se os valores dos fatores de distorção de tensão das barras consideradas.

Quinto passo:

Tem-se aqui quatro casos:

Primeiro caso: Todos os fatores de distorção de tensão ficaram abaixo dos valores preestabelecidos, passa-se ao próximo passo.

Segundo caso: Se os fatores individuais de distorção de tensão para o qual o filtro foi projetado ou os fatores totais de distorção de tensão não atingiram os valores desejados, deve-se voltar ao passo anterior e aumentar o valor de Q_{BCN} ou instalar outro filtro.

Terceiro caso: Se os fatores individuais de distorção de tensão para o qual o filtro foi instalado atingiram os valores desejados e os fatores individuais de distorção de tensão para os outros harmônicos não atingiram, deve-se instalar outro filtro, normalmente aquele que produziu o segundo maior fator de distorção individual no passo 1.

Quarto caso: Se os fatores individuais de distorção de tensão para o qual o filtro foi instalado atingiram os valores desejados e o fator de distorção total para uma das barras consideradas for maior que o desejado, deve-se instalar outro filtro, normalmente para o harmônico que produziu o segundo maior fator de distorção individual do passo 1.

Sexto passo:

Sendo que todos os fatores de distorção individuais e totais de tensão ficaram abaixo dos limites preestabelecidos, entra-se na etapa de verificação. Esta deve ser feita para todos os filtros instalados.

Nesta etapa, executa-se o fluxo de harmônico e obtém-se todos os harmônicos de corrente que circulam pelos bancos de capacitores dos filtros colocados.



De posse dos harmônicos de corrente que circulam pelos filtros e da corrente à frequência fundamental que circula para cada filtro, calculam-se os valores de Q_{teste} e U_{teste} através das equações:

$$U_{teste} = a. U_1 \cdot \left[1 + \sum \frac{I_n}{n \cdot I_1} \right] \quad (56)$$

$$Q_{teste} = 3 \cdot X_{Cl} \cdot \left[I_1^2 + \sum \frac{I_n^2}{n} \right] \quad (\text{para valores em [Var]}) \quad (57)$$

$$Q_{teste} = X_{Cl} \cdot \left[I_1^2 + \sum \frac{I_n^2}{n} \right] \quad (\text{para valores em [P.U.]}) \quad (58)$$

O filtro analisado estará aprovado se:

$$U_{teste} \leq U_{BCN} \quad (59)$$

$$Q_{teste} \leq Q_{BCN} \quad (60)$$

Caso um ou mais filtros não verifiquem as desigualdades citadas, deve-se voltar ao quarto passo e aumentar U_{BCN} e/ou Q_{BCN} , ou até mesmo, instalar outros filtros.

Sétimo passo:

Satisfeitas as condições de verificação, deve-se verificar a ocorrência de ressonância série do sistema.

Para isto, deve-se promover a retirada de cada filtro instalado (um a um) e verificar se ocorre ressonância paralela. Ocorrendo, deve-se promover o intertravamento do filtro que causou a ressonância, para que este não seja retirado sozinho do sistema, ou seja, sempre que este filtro tenha de ser retirado para efeito de manutenção, outro filtro seja retirado juntamente, para não haver problema de ressonância paralela.

Exemplos de instalação de filtros de harmônicos serão mostrados no próximo capítulo.

Oitavo passo:

Deve ser feita uma análise econômica, visando escolher a melhor solução entre as possíveis soluções técnicas encontradas.

CAPÍTULO III

EXEMPLOS



Este capítulo visa a apresentar alguns exemplos envolvendo filtros para correção de harmônicos e correção do fator de potência.

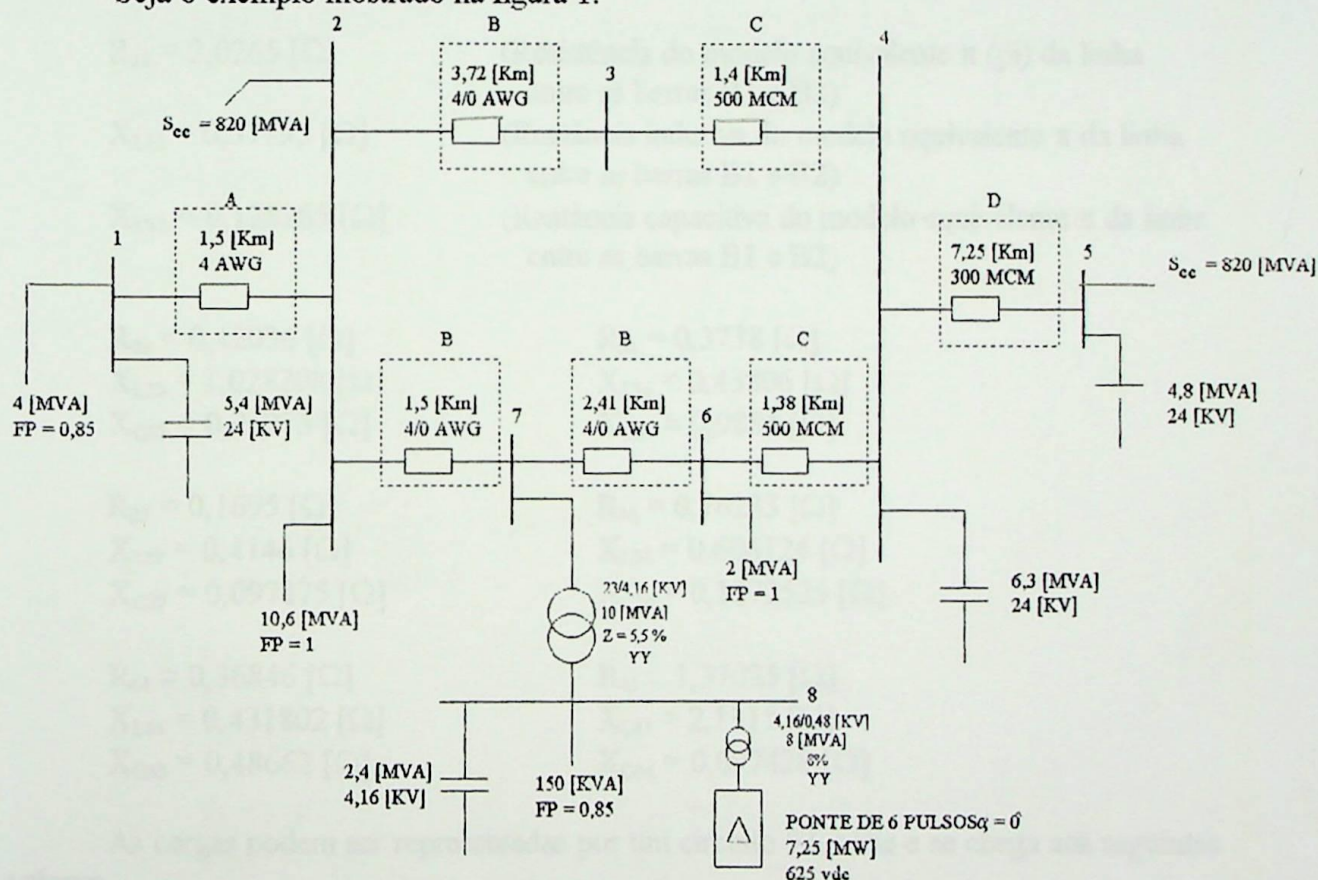
Os exemplos mostrados seguirão o mesmo procedimento mostrado no capítulo II, e têm como objetivo, comparar os resultados fornecidos pelo programa MTFILTRO, que serão mostrados no capítulo V.

Será utilizado para efeitos de simulação, o programa MICROTRAN.

Com o objetivo de evitar que esta dissertação de mestrado se torne demasiadamente longa, mostra-se apenas o primeiro exemplo de forma detalhada. Dos demais exemplos, mostram-se apenas os resultados finais. Todavia para que se possa acompanhá-los em detalhes, estes exemplos são mostrados de forma completa em um "caderno extra", que pode ser encontrada na biblioteca da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, BIM.

EXEMPLO 1:

Seja o exemplo mostrado na figura 1.



A - $R = 1,351 [\Omega/\text{Km}]$
 $XL = 0,3853 [\Omega/\text{Km}]$
 $XC = 0,08551 [\Omega/\text{Km}]$

C - $R = 0,267 [\Omega/\text{Km}]$
 $XL = 0,3129 [\Omega/\text{Km}]$
 $XC = 0,0706 [\Omega/\text{Km}]$

B - $R = 0,113 [\Omega/\text{Km}]$
 $XL = 0,2764 [\Omega/\text{Km}]$
 $XC = 0,06525 [\Omega/\text{Km}]$

D - $R = 0,189 [\Omega/\text{Km}]$
 $XL = 0,294 [\Omega/\text{Km}]$
 $XC = 0,06712 [\Omega/\text{Km}]$

Figura 1 - Sistema para a análise



Os harmônicos de corrente no barramento 8 medidos foram:

AMPLITUDES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE NO BARRAMENTO 8	
ORDEM DO HARMÔNICO	PERCENTAGEM DA FUNDAMENTAL
5	17,95
7	11,48
11	5,19
13	3,48
17	1,59
19	1,20
CORRENTE NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL = 1038 [A]	

Tabela 1 - Harmônicos de corrente medidos.

Através dos dados do sistema, chega-se a:

$R_{12} = 2,0265 \text{ } [\Omega]$	(Resistência do modelo equivalente π (pi) da linha entre as barras B1 e B2)
$X_{L12} = 0,57795 \text{ } [\Omega]$	(Reatância indutiva do modelo equivalente π da linha entre as barras B1 e B2)
$X_{C12} = 0,128265 \text{ } [\Omega]$	(Reatância capacitiva do modelo equivalente π da linha entre as barras B1 e B2)
$R_{23} = 0,42036 \text{ } [\Omega]$	$R_{34} = 0,3738 \text{ } [\Omega]$
$X_{L23} = 1,028208 \text{ } [\Omega]$	$X_{L34} = 0,43806 \text{ } [\Omega]$
$X_{C23} = 0,24273 \text{ } [\Omega]$	$X_{C34} = 0,9884 \text{ } [\Omega]$
$R_{27} = 0,1695 \text{ } [\Omega]$	$R_{76} = 0,76233 \text{ } [\Omega]$
$X_{L27} = 0,4146 \text{ } [\Omega]$	$X_{L76} = 0,606124 \text{ } [\Omega]$
$X_{C27} = 0,097875 \text{ } [\Omega]$	$X_{C76} = 0,1572525 \text{ } [\Omega]$
$R_{64} = 0,36846 \text{ } [\Omega]$	$R_{45} = 1,37025 \text{ } [\Omega]$
$X_{L64} = 0,431802 \text{ } [\Omega]$	$X_{L45} = 2,1315 \text{ } [\Omega]$
$X_{C64} = 0,48662 \text{ } [\Omega]$	$X_{C64} = 0,097428 \text{ } [\Omega]$

As cargas podem ser representadas por um circuito RL série e se chega aos seguintes valores.

$R_1 = 133,25 \text{ } [\Omega]$	$R_6 = 288 \text{ } [\Omega]$
$X_{L1} = 82,69 \text{ } [\Omega]$	$R_8 = 98,05 \text{ } [\Omega]$
$R_2 = 54,34 \text{ } [\Omega]$	$X_{L8} = 60,77 \text{ } [\Omega]$

Para os bancos de capacitores, tem-se:

$X_{C1} = 106,67 \text{ } [\Omega]$	$X_{C4} = 91,43 \text{ } [\Omega]$
$X_{C5} = 120 \text{ } [\Omega]$	$X_{C8} = 7,21 \text{ } [\Omega]$



Para as potências de curto-circuito mostradas, tem-se:

$$X_{L2} = 0,7024 [\Omega]$$

$$X_{L5} = 0,7024 [\Omega]$$

O sistema mostrado na figura 1 tem três níveis de tensão que serão usados como valores de base, juntamente com uma potência de base de 100 [MVA].

Tem-se então:

$$S_{base} = 100 [\text{MVA}]$$

$$U_{base} = 24 [\text{kV}]$$

$$I_{base} = 2405,63 [\text{A}]$$

$$Z_{base} = 5,76 [\Omega]$$

$$S_{base} = 100 [\text{MVA}]$$

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

$$I_{base} = 13878,6 [\text{A}]$$

$$Z_{base} = 0,173056 [\Omega]$$

$$S_{base} = 100 [\text{MVA}]$$

$$U_{base} = 480 [\text{Volts}]$$

$$I_{base} = 120281,3 [\text{A}]$$

$$Z_{base} = 0,002364 [\Omega]$$

Assim, os dados anteriores em valores por unidade [P.U.] são:

$$R_{12} = 0,3518229 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L12} = 0,1003385 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C12} = 0,02226823 [\text{P.U.}]$$

$$R_{23} = 0,072979 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L23} = 0,1785083 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C23} = 0,0421406 [\text{P.U.}]$$

$$R_{34} = 0,0648958 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L34} = 0,0760521 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C34} = 0,0171597 [\text{P.U.}]$$

$$R_{27} = 0,02942708 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L27} = 0,0719792 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C27} = 0,01699 [\text{P.U.}]$$

$$R_{76} = 0,04728 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L76} = 0,11565 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C76} = 0,0273008 [\text{P.U.}]$$

$$R_{64} = 0,063969 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L64} = 0,074966 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C64} = 0,01691458 [\text{P.U.}]$$

$$R_{15} = 0,237891 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L15} = 0,370052 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C15} = 0,08448264 [\text{P.U.}]$$

$$R_1 = 19,66 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L1} = 14,36 [\text{P.U.}]$$

$$R_2 = 9,434 [\text{P.U.}]$$

$$R_6 = 50,00 [\text{P.U.}]$$

$$R_8 = 566,58 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L8} = 351,16 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C1} = 18,52 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C4} = 15,87 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L2} = 0,121944 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C5} = 20,83 [\text{P.U.}]$$

$$X_{C8} = 41,67 [\text{P.U.}]$$

$$X_{L5} = 0,121944 [\text{P.U.}]$$

A impedância equivalente Thevenin do sistema, calculada a partir da barra 8 é de:

$$Z_{TH8} = j.0,5 [\text{P.U.}]$$

ou seja:

$$X_{TH8} = 0,5 [\text{P.U.}]$$

A parte real da impedância de Thevenin calculada foi muito menor que a parte imaginária, podendo ser, neste caso, desprezada.

Tem-se, também, que a impedância representativa do transformador da barra 8 (B8) vale:



$$Z_T = 1 \text{ [P.U.]}$$

Assim a representação monofásica (para a fase Λ) referente à barra 8 do sistema, fica:

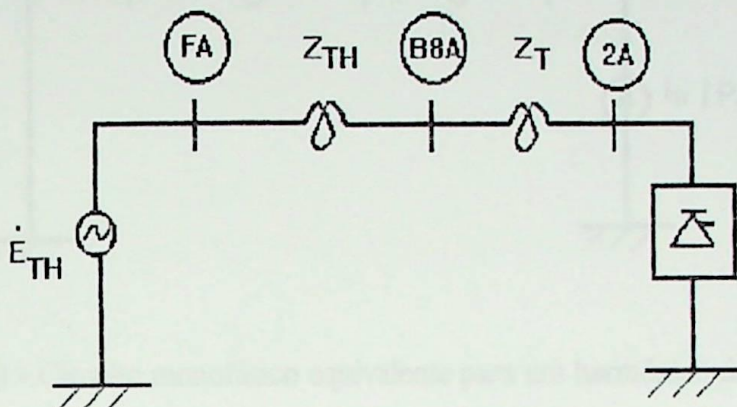


Figura 2 - Equivalente monofásico do sistema, referente à barra 8

Onde: $Z_{TH} = j,0,5 \text{ [P.U.]}$

$$Z_T = j,1,0 \text{ [P.U.]}$$

Através de uma análise da ponte conversora, utilizando a teoria de conversão estática, obtêm-se os valores:

$$E_{TH} = 1,023 \text{ [P.U.]}$$

$$U_{B8A} = 1,01 \text{ [P.U.]}$$

Os harmônicos de corrente medidos, mostrados na tabela 1, transformados em valores [P.U.] são:

$$I_5 = 0,0135 \text{ [P.U.]}$$

$$I_{13} = 0,0026 \text{ [P.U.]}$$

$$I_7 = 0,0086 \text{ [P.U.]}$$

$$I_{17} = 0,0012 \text{ [P.U.]}$$

$$I_{11} = 0,0039 \text{ [P.U.]}$$

$$I_{19} = 0,0009 \text{ [P.U.]}$$

Com isto, pode-se mostrar o circuito monofásico equivalente a um harmônico de ordem n na figura 3. Após uma simulação deste circuito (anexo 1, arquivo caso1.dat), podem-se calcular os fatores de distorção de tensão individual e total da barra B8A, utilizando as equações 46 e 47 do capítulo anterior, repetidas aqui por questão de conveniência.

$$FD_{Un}\% = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \quad \text{(Fator individual de distorção de tensão.)}$$

$$FD_U\% = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \cdot 100 \quad \text{(Fator total de distorção de tensão.)}$$

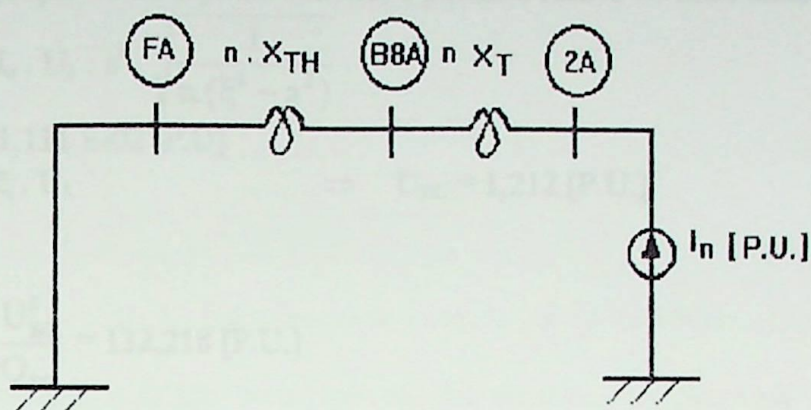


Figura 3 - Circuito monofásico equivalente para um harmônico de ordem n.

Assim, têm-se os fatores de distorção de tensão na barra B8A em %, mostrados na tabela 2.

n	F.D.(%)
5	3,34
7	2,98
11	2,12
13	1,67
17	1,01
19	0,85
Total	5,39

Tabela 2 - Fatores de distorção de tensão.

Comparando estes fatores de distorção de tensão com a Norma SEN 21 1811 (1976 - 11 -15) SWEDEN mostrada no capítulo I, vê-se que os fatores individuais de distorção para o quinto e o sétimo harmônicos estão acima do máximo permitido, além do fator de distorção de tensão total.

Neste caso, é recomendada a instalação de um filtro de 5º harmônico na barra B8A, o que será feito a seguir.

Instalação de um filtro sintonizado de 5º harmônico na barra B8A:

Filtro básico:

$$a = \frac{5^2}{5^2 - 1} = \frac{25}{24}$$

$$U_1 = 1,01 \text{ [P.U.]}$$

$$I_n = I_5 = 0,0135 \text{ [P.U.]}$$

$$\xi = 1,2$$



Pela equação 48 do capítulo anterior, a potência reativa do filtro básico será de:

$$Q_{BC} = I_n \cdot U_1 \cdot a^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (\xi^2 - a^2)}}$$

$$Q_{BC} = 1,111 \text{ E-02 [P.U.]}$$

$$U_{BC} = \xi \cdot U_1 \quad \Rightarrow \quad U_{BC} = 1,212 \text{ [P.U.]}$$

Assim:

$$X_{C1} = \frac{U_{BC}^2}{Q_{BC}} = 132,218 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{R1} = \frac{1,03 \cdot X_{C1}}{n^2} = 5,447 \text{ [P.U.]}$$

$$R = 0,908 \text{ [P.U.]} \quad (\text{Fator de qualidade igual a trinta})$$

A corrente à frequência fundamental que circula por este filtro básico vale:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (X_{C1} - X_{R1})^2}}$$

$$I_1 = \frac{1,01}{\sqrt{0,908^2 + (132,218 - 5,447)^2}}$$

$$I_1 = 7,967 \text{ E-03 [P.U.]}$$

O circuito monofásico equivalente para um harmônico de ordem n, fica como mostrado na figura 4:

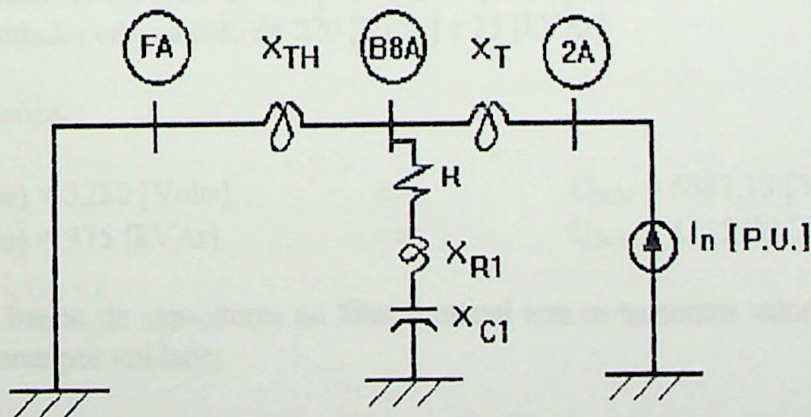


Figura 4 - Equivalente monofásico para um harmônico de ordem n.

Assim simulando-se este circuito (anexo 2, arquivo Básico11.dat), obtêm-se os harmônicos de corrente que circulam pelo filtro básico, mostrados na tabela 3.



n	I_n [P.U.]
5	9,883455E-3
7	1,322315E-3
11	4,016166E-4
13	2,518966E-4
17	1,092908E-4
19	8,064458E-5

Tabela 3 - Harmônicos de corrente pelo filtro básico.

Utilizando-se as equações 51 e 53 do capítulo anterior, repetidas aqui,

$$U_{BC} = a \cdot U_1 \cdot \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{n \cdot I_1} \right]$$

$$Q_{BC} = X_{Cl} \cdot \left[I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{n} \right]$$

Têm-se:

$$U_{BC} = 1,3446850715 \text{ [P.U.]}$$

$$Q_{BC} = 1,101111541E-2 \text{ [P.U.]}$$

Assim:

$$U_{BC} = 5602,90 \text{ [Volts]}$$

$$U_{BC}(\text{fase}) = 3234,84 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BC} = 367037,2 \text{ [ar]}$$

$$Q_{BC}(\text{fase}) = 367037,2 \text{ [VAr]}$$

De um catálogo de bancos de capacitores monofásicos, obtêm-se:

- . Uma unidade de 2300 [Volts] e 200 [kVAr] em série com
- . Duas unidades em série de 380 [Volts] e 50 [kVAr] em série com
- . Três unidades em paralelo de 220 [Volts] e 25 [kVAr]

o que totaliza:

$$U_{BCN}(\text{fase}) = 3280 \text{ [Volts]}$$

$$\Rightarrow$$

$$U_{BCN} = 5681,13 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN}(\text{fase}) = 375 \text{ [kVAr]}$$

$$\Rightarrow$$

$$Q_{BCN} = 1125 \text{ [kVAr]}$$

Assim o banco de capacitores do filtro nominal tem os seguintes valores de tensão e potência em valores por unidade:

$$U_{BCN} = 1,366 \text{ [P.U.]}$$

$$Q_{BCN} = 1,125E-2 \text{ [P.U.]}$$

Assim o filtro nominal terá os seguintes parâmetros:



$$X_{C1} = 165,863 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{R1} = 6,834 \text{ [P.U.]}$$

$$R = 1,139 \text{ [P.U.]}$$

5.

O circuito monofásico para um harmônico de ordem n fica tal como mostra a figura

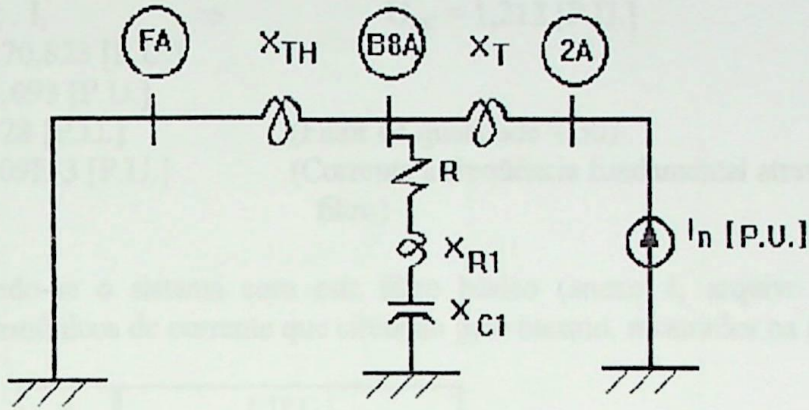


Figura 5 - Equivalente monofásico do sistema com a inclusão do filtro, para um harmônico de ordem n .

Simulando-se este circuito (anexo3, arquivo Caso1-1.dat), obtêm os fatores de distorção de tensão para a barra B8A em %, mostrados na tabela 4.

n	F.D(%)
5	1,38
7	2,60
11	1,95
13	1,54
17	0,94
19	0,79
Total	4,04

Tabela 4 - Fatores de distorção de tensão após a instalação do filtro de 5° harmônico.

Observa-se uma diminuição significativa no fator de distorção individual de tensão para o quinto harmônico e do fator de distorção total, bem como uma ligeira diminuição nos fatores de distorção individual de tensão para os outros harmônicos. Porém, o maior fator de distorção de tensão, agora, é para o sétimo harmônico (2,60%), valor este que ultrapassa o máximo permitido pela norma adotada. Portanto, é recomendável a instalação de um filtro sintonizado para este harmônico.

Instalação de um filtro sintonizado de sétimo harmônico na barra B8A:

Filtro básico:

$$a = 49/48$$



$$I_n = I_7 = 0,0086 \text{ [P.U.]}$$

$$U_1 = 1,01 \text{ [P.U.]}$$

$$\xi = 1,2$$

Através da equação 48 do capítulo anterior, vem:

$$Q_{BC} = 5,424E-3 \text{ [P.U.]}$$

$$U_{BC} = \xi \cdot I_1 \Rightarrow U_{BC} = 1,212 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{C1} = 270,823 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{R1} = 5,693 \text{ [P.U.]}$$

$$R = 1,328 \text{ [P.U.]}$$

(Fator de qualidade = 30)

$$I_1 = 3,809E-3 \text{ [P.U.]}$$

(Corrente à frequência fundamental através deste filtro)

Simulando-se o sistema com este filtro básico (anexo 4, arquivo Básico12.dat), obtêm-se os harmônicos de corrente que circulam pelo mesmo, mostrados na tabela 5.

n	I_n [P.U.]
5	5,581972E-4
7	5,936557E-3
11	4,563294E-4
13	2,933162E-4
17	1,064486E-4
19	7,718707E-5

Tabela 5 - Harmônicos de corrente pelo filtro básico.

Através das equações 51 e 53 do capítulo anterior, têm-se:

$$U_{BC} = 1,310330457 \text{ [P.U.]}$$

$$Q_{BC} = 5,316449057 E-3 \text{ [P.U.]}$$

Assim:

$$U_{BC} = 5450,97 \text{ [Volts]}$$

$$U_{BC}(\text{fase}) = 3147,12 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BC} = 531644,9 \text{ [VAr]}$$

$$Q_{BC}(\text{fase}) = 177214,97 \text{ [VAr]}$$

De um catálogo de bancos de capacitores monofásicos, chega-se a:

$$U_{BCN}(\text{fase}) = 3180 \text{ [V]}$$

$$\Rightarrow U_{BCN} = 5507,92 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN}(\text{fase}) = 180 \text{ [kVAr]}$$

$$\Rightarrow Q_{BCN} = 540 \text{ [kVAr]}$$

Assim:

$$U_{BCN} = 1,324 \text{ [P.U.]}$$

$$Q_{BCN} = 5,4E-3 \text{ [P.U.]}$$

e o filtro nominal de sétimo harmônico terá os seguintes parâmetros:



$$X_{C1} = 324,625 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{R1} = 6,824 \text{ [P.U.]}$$

$$R = 1,592 \text{ [P.U.]} \quad (\text{F.Q.} = 30)$$

O circuito monofásico para um harmônico de ordem n fica tal como mostra a figura

6.

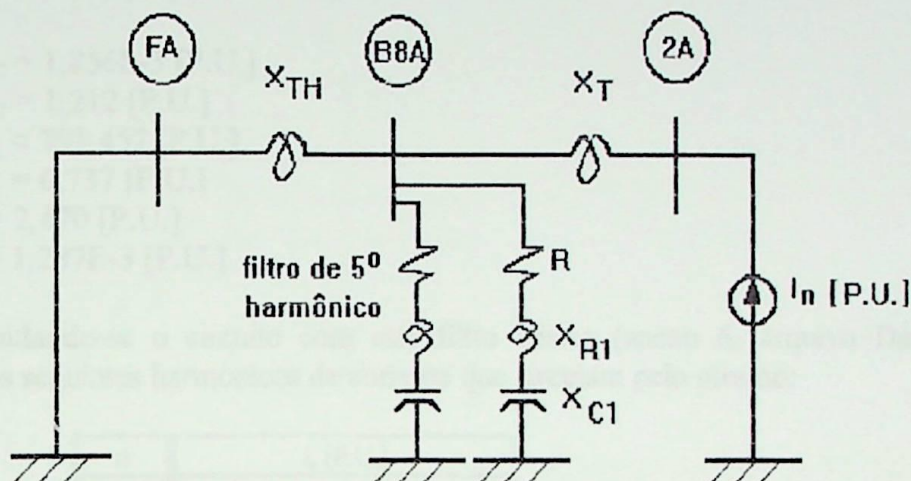


Figura 6 - Equivalente de Thevenin para um harmônico de ordem n do sistema analisado com os filtros de quinto e sétimo harmônicos.

Simulando-se este circuito (anexo5, arquivo Caso1-2.dat), obtêm-se os fatores de distorção de tensão na barra B8A, em %, mostrados na tabela 6.

n	F.D.(%)
5	1,41
7	1,16
11	1,75
13	1,41
17	0,86
19	0,73
Total	3,11

Tabela 6 - Fatores de distorção de tensão após a instalação do filtro de 7º harmônico.

Nota-se que o fator de distorção de tensão total ainda está superior ao máximo permitido pela norma adotada.

A solução utilizada aqui é a instalação de um filtro para o décimo primeiro harmônico. Poder-se-ia, ao invés disto alterar o filtro de sétimo e/ou de quinto, ou instalar um filtro de décimo terceiro harmônico, sintonizado ou amortecido, etc.

Instalação de um filtro sintonizado de 11º harmônico na barra B8A:

Filtro básico:



$$a = 121/120$$

$$U_1 = 1,01 \text{ [P.U.]}$$

$$I_n = 0,0039 \text{ [P.U.]}$$

$$\xi = 1,2$$

Através da equação 48 do capítulo anterior, vem:

$$Q_{BC} = 1,856E-3 \text{ [P.U.]}$$

$$U_{BC} = 1,212 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{C1} = 791,457 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{R1} = 6,737 \text{ [P.U.]}$$

$$R = 2,470 \text{ [P.U.]}$$

$$I_1 = 1,287E-3 \text{ [P.U.]}$$

Simulando-se o circuito com este filtro básico (anexo 6, arquivo Básico13.dat), obtêm-se os seguintes harmônicos de corrente que circulam pelo mesmo:

n	I_n [P.U.]
5	1,154381E-4
7	1,813770E-4
11	2,477211E-3
13	4,414367E-4
17	1,160244E-4
19	7,777994E-5

Tabela 7 - Harmônicos de corrente pelo filtro básico.

Através das equações 51 e 53 do capítulo anterior, têm-se:

$$U_{BC} = 1,270904026 \text{ [P.U.]}$$

$$Q_{BC} = 1,77104668E-3 \text{ [P.U.]}$$

Assim:

$$U_{BC} = 5286,96 \text{ [Volts]}$$

$$\Rightarrow U_{BC}(\text{fase}) = 3052,43 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BC} = 177104,67 \text{ [VAr]}$$

$$\Rightarrow Q_{BC}(\text{fase}) = 59034,89 \text{ [VAr]}$$

Novamente de um catálogo de banco de capacitores monofásicos, obtêm-se:

$$U_{BCN}(\text{fase}) = 3060 \text{ [Volts]}$$

$$\Rightarrow U_{BCN} = 5300,08 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN}(\text{fase}) = 60 \text{ [kVAr]}$$

$$\Rightarrow Q_{BCN} = 180 \text{ [kVAr]}$$

Assim, os parâmetros, em valores por unidade, do filtro nominal ficam:

$$U_{BCN} = 1,274 \text{ [P.U.]}$$

$$Q_{BCN} = 1,8E-3 \text{ [P.U.]}$$



$$X_{C1} = 901,709 \text{ [P.U.]}$$

$$X_{R1} = 7,676 \text{ [P.U.]}$$

$$R = 2,814 \text{ [P.U.]}$$

(Fator de qualidade igual a 30)

Simulando-se o circuito, com a inclusão deste filtro (anexo 7, arquivo Caso1-3.dat) e calculando-se os fatores de distorção de tensão para a barra B8A, obtêm-se os valores mostrados na tabela 8.

n	F.D(%)
5	1,42
7	1,18
11	0,87
13	1,20
17	0,79
19	0,67
Total	2,58

Tabela 8 - Fatores de distorção de tensão após a instalação do filtro de 11° harmônico

Observa-se que todos os fatores de distorção de tensão estão abaixo do máximo permitido pela norma adotada. Passa-se agora, portanto, à etapa de verificação.

Etapa de verificação:

Da última simulação (arquivo Caso1-3.out), obtêm-se os harmônicos de corrente que circulam pelos três filtros instalados. Estes harmônicos estão mostrados na tabela 9.

n	$I_{\text{filtro de 5}}$ [[P.U.]	$I_{\text{filtro de 7}}$ [P.U.]	$I_{\text{filtro de 11}}$ [P.U.]
5	9,493874E-3	4,660131E-4	1,012354E-4
7	4,938323E-4	5,641862E-3	1,588574E-4
11	1,457503E-4	1,921983E-4	2,342992E-3
13	1,588483E-4	1,895687E-4	3,955802E-4
17	7,503862E-5	8,239485E-5	1,030459E-4
19	5,606449E-5	6,031727E-5	6,899249E-5

Tabela 9 - Harmônicos de corrente através dos filtros instalados.

Com estes valores e aplicando-se as equações 56 e 58 do capítulo anterior, têm-se:

$$U_{\text{teste}} = a \cdot U_1 \cdot \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{n \cdot I_1} \right]$$

$$Q_{\text{teste}} = X_{C1} \cdot \left[I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{n \cdot I_1} \right]$$



$$Q_{\text{teste}} = X_{C1} \cdot [I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n^2}{n \cdot I_1}]$$

Filtro de 5° harmônico:

$$\begin{aligned} U_{BCN} &= 1,366 \text{ [P.U.]} \\ Q_{BCN} &= 1,125E-2 \text{ [P.U.]} \\ X_{C1} &= 165,863 \text{ [P.U.]} \\ X_{R1} &= 6,834 \text{ [P.U.]} \\ R &= 1,139 \text{ [P.U.]} \\ I_1 &= 6,353E-3 \text{ [P.U.]} \\ U_{\text{teste}} &= 1,383753 \text{ [P.U.]} \\ Q_{\text{teste}} &= 9,6865878E-3 \text{ [P.U.]} \end{aligned}$$

Filtro de 7° harmônico:

$$\begin{aligned} U_{BCN} &= 1,324 \text{ [P.U.]} \\ Q_{BCN} &= 5,4E-3 \text{ [P.U.]} \\ X_{C1} &= 324,625 \text{ [P.U.]} \\ X_{R1} &= 6,824 \text{ [P.U.]} \\ R &= 1,592 \text{ [P.U.]} \\ I_1 &= 3,178E-3 \text{ [P.U.]} \\ U_{\text{teste}} &= 1,335766 \text{ [P.U.]} \\ Q_{\text{teste}} &= 4,7710333E-3 \text{ [P.U.]} \end{aligned}$$

Filtro de 11° harmônico:

$$\begin{aligned} U_{BCN} &= 1,2744 \text{ [P.U.]} \\ Q_{BCN} &= 1,8E-3 \text{ [P.U.]} \\ X_{C1} &= 901,709 \text{ [P.U.]} \\ X_{R1} &= 7,676 \text{ [P.U.]} \\ R &= 2,814 \text{ [P.U.]} \\ I_1 &= 1,130E-3 \text{ [P.U.]} \\ U_{\text{teste}} &= 1,285244 \text{ [P.U.]} \\ Q_{\text{teste}} &= 1,6181373E-3 \text{ [P.U.]} \end{aligned}$$

Assim, os valores de U_{teste} de cada filtro não verificam (são maiores que U_{BCN}). Aumentando-se o valor da tensão nominal de cada filtro, através de combinações entre unidades monofásicas de bancos de capacitores disponíveis em catálogos, vêm:

Filtro de 5° harmônico:

$$\begin{aligned} U_{BCN}(\text{fase}) &= 3400 \text{ [Volts]} & \Rightarrow & U_{BCN} = 5888,97 \text{ [Volts]} \\ Q_{BCN}(\text{fase}) &= 375 \text{ [kVAr]} & \Rightarrow & Q_{BCN} = 1125 \text{ [kVAr]} \\ \text{Assim:} & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{BCN} &= 1,416 \text{ [P.U.]} \\ Q_{BCN} &= 1,125E-2 \text{ [P.U.]} \\ X_{C1} &= 178,227 \text{ [P.U.]} \\ X_{R1} &= 7,343 \text{ [P.U.]} \\ R &= 1,224 \text{ [P.U.]} \\ I_1 &= 5,910E-3 \text{ [P.U.]} \end{aligned}$$

Filtro de 7° harmônico:

$$\begin{aligned} U_{BCN}(\text{fase}) &= 3280 \text{ [Volts]} & \Rightarrow & U_{BCN} = 5681,13 \text{ [Volts]} \\ Q_{BCN}(\text{fase}) &= 180 \text{ [kVAr]} & \Rightarrow & Q_{BCN} = 540 \text{ [kVAr]} \end{aligned}$$



Assim:

$$\begin{aligned}
 U_{BCN} &= 1,366 \text{ [P.U.]} \\
 Q_{BCN} &= 5,4E-3 \text{ [P.U.]} \\
 X_{Cl} &= 345,55 \text{ [P.U.]} \\
 X_{Rl} &= 7,264 \text{ [P.U.]} \\
 R &= 1,695 \text{ [P.U.]} \\
 I_1 &= 2,986E-3 \text{ [P.U.]}
 \end{aligned}$$

Filtro de 11° harmônico:

$$\begin{aligned}
 U_{BCN}(\text{fase}) &= 3180 \text{ [Volts]} & \Rightarrow & U_{BCN} = 5507,92 \text{ [Volts]} \\
 Q_{BCN}(\text{fase}) &= 60 \text{ [kVAr]} & \Rightarrow & Q_{BCN} = 180 \text{ [kVAr]}
 \end{aligned}$$

Assim:

$$\begin{aligned}
 U_{BCN} &= 1,324 \text{ [P.U.]} \\
 Q_{BCN} &= 1,8E-3 \text{ [P.U.]} \\
 X_{Cl} &= 973,876 \text{ [P.U.]} \\
 X_{Rl} &= 8,290 \text{ [P.U.]} \\
 R &= 3,040 \text{ [P.U.]} \\
 I_1 &= 1,046E-3 \text{ [P.U.]}
 \end{aligned}$$

Simulando-se o sistema com estes três filtros (anexo 8, arquivo Caso1-4.dat), têm-se os fatores de distorção de tensão para a barra B8A, mostrados na tabela 10.

n	F.D(%)
5	1,49
7	1,23
11	0,91
13	1,22
17	0,80
19	0,68
Total	2,68

Tabela 10 - Fatores de distorção de tensão após as modificações nos filtros.

Sendo os fatores de distorção de tensão dentro do limite imposto pela norma adotada, podem-se calcular através das equações 56 e 58 do capítulo anterior os valores de U_{teste} e Q_{teste} para cada filtro. Para isto, os valores dos harmônicos de corrente que circulam pelos filtros instalados são mostrados na tabela 11.

n	$I_{\text{filtro de 5}}$ [[P.U.]	$I_{\text{filtro de 7}}$ [P.U.]	$I_{\text{filtro de 11}}$ [P.U.]
5	9,251330E-3	4,579639E-4	9,805093E-5
7	4,787646E-4	5,520267E-3	1,531989E-4
11	1,422109E-4	1,892901E-4	2,275985E-3
13	1,508334E-4	1,816931E-4	3,737501E-4



17	7,089006E-5	7,857055E-5	9,685567E-5
19	5,292196E-5	5,747109E-5	6,479466E-5

Tabela 11 - Harmônicos de corrente através dos filtros instalados.
Assim, têm-se:

Filtro de 5^o harmônico:

$$\begin{aligned}U_{BCN} &= 1,416 \text{ [P.U.]} \\Q_{BCN} &= 1,125E-2 \text{ [P.U.]} \\U_{teste} &= 1,399 \text{ [P.U.]} \\Q_{teste} &= 9,282E-3 \text{ [P.U.]}\end{aligned}$$

Filtro de 7^o harmônico:

$$\begin{aligned}U_{BCN} &= 1,366 \text{ [P.U.]} \\Q_{BCN} &= 5,4E-3 \text{ [P.U.]} \\U_{teste} &= 1,348 \text{ [P.U.]} \\Q_{teste} &= 4,602E-3 \text{ [P.U.]}\end{aligned}$$

Filtro de 11^o harmônico:

$$\begin{aligned}U_{BCN} &= 1,324 \text{ [P.U.]} \\Q_{BCN} &= 1,8E-3 \text{ [P.U.]} \\U_{teste} &= 1,297 \text{ [P.U.]} \\Q_{teste} &= 1,5405E-3 \text{ [P.U.]}\end{aligned}$$

Como todos os valores de U_{teste} e Q_{teste} verificam e todos os fatores de distorção de tensão estão abaixo do máximo permitido pela norma adotada, os filtros estão aprovados.

Etapas de verificação de contingências:

Nesta etapa, calcula-se a tensão eficaz para a barra B8A, com todos os filtros instalados, utilizando-se a fórmula seguinte:

$$U_{ef} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}$$

Assim, resulta para a barra B8A, uma tensão eficaz calculada, neste caso, por:

$$U_{ef} = \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2 + U_{17}^2 + U_{19}^2}$$

A tensão eficaz calculada foi de:

$$U_{B8A}(ef) = 1,0103615 \text{ [P.U.]} \quad (\text{anexo 8, arquivo Caso1-4.dat})$$

Retirando os filtros instalados um a um, simulando e calculando para cada caso a tensão eficaz, têm-se:

$$U_{B8A}(ef) = 1,010961 \text{ [P.U.]} \quad \text{Sem o filtro de 5}^{\text{o}} \text{ harmônico (anexo 9 arquivo Caso1-5.dat)}$$

$$U_{B8A}(ef) = 1,010679 \text{ [P.U.]} \quad \text{Sem o filtro de 7}^{\text{o}} \text{ harmônico (anexo 10, arquivo Caso1-6.dat)}$$



$U_{B8A}(ef) = 1,010513$ [P.U.] Sem o filtro de 11^o harmônico(anexo 11, arquivo Casol-7.dat)

Adotando-se um fator de ressonância de 1,1 ou seja, se ao retirar um filtro, a tensão subir em 10% ou mais, isto caracterizará ressonância. A análise neste caso se restringe apenas à barra B8A.

Assim, têm-se os seguintes fatores de sobretensão calculados:

$$F.S. = \frac{1,010961}{1,010362} = 1,000594 \quad (\text{quando se retira o filtro de } 5^{\text{o}} \text{ harmônico})$$

$$F.S. = \frac{1,010679}{1,010362} = 1,000314 \quad (\text{quando se retira o filtro de } 7^{\text{o}} \text{ harmônico})$$

$$F.S. = \frac{1,010515}{1,010362} = 1,000149 \quad (\text{quando se retira o filtro de } 11^{\text{o}} \text{ harmônico}).$$

Como nenhum fator de sobretensão é maior ou igual a 1,1, não haverá problema de ressonância na retirada de qualquer filtro.

O espectro de harmônicos de tensão para a barra B8A antes e após a instalação dos filtros é mostrado na figura 7.

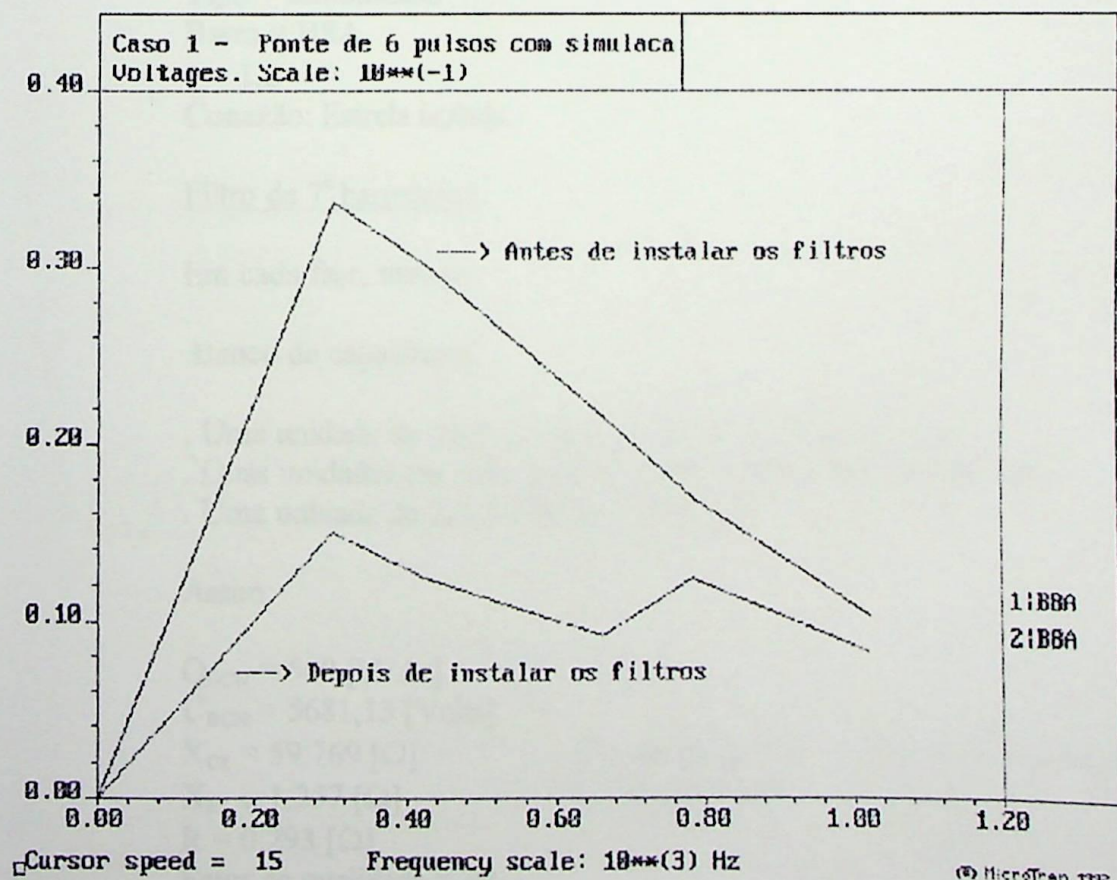




Figura 7 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B8A antes e após a instalação dos filtros.

A especificação final dos filtros fica:

Filtro de 5º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

- . Uma unidade de 2300 [Volts] e 200 [kVAr], em série com
- . Duas unidades em série de 440 [Volts] e 50 [kVAr], em série com
- . Três unidades em paralelo de 220 [Volts] e 25 [kVAr]

Assim:

$$Q_{BCN} = 1125 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 5888,97 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 30,827 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 86,047 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 1,270 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 3,369 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,212 \text{ [\Omega]}$$

$$\text{Fator de qualidade} = 30$$

Tipo = Sintonizado

Barra = B8A

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 7º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

- . Uma unidade de 2300 [Volts] e 100 [kVAr], em série com
- . Duas unidades em série de 380 [Volts] e 30 [kVAr], em série com
- . Uma unidade de 220 [Volts] e 20 [kVAr]

Assim:

$$Q_{BCN} = 540 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 5681,13 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 59,769 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 44,381 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 1,257 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 3,334 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,293 \text{ [\Omega]}$$

$$\text{Fator de qualidade} = 30$$



Tipo = Sintonizado

Barra = B8A

$\xi = 1,2$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 11^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

. Uma unidade de 2300 [Volts] e 50 [kVAr], em série com

. Duas unidades em série de 440 [Volts] e 5 [kVAr],

Assim:

$$Q_{BCN} = 180 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 5507,92 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 168,535 \text{ } [\Omega]$$

$$C = 15,739 \text{ } [\mu\text{F}] \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{RI} = 1,434 \text{ } [\Omega]$$

$$L = 3,805 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,526 \text{ } [\Omega]$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B8A

$\xi = 1,2$

Conexão: Estrela isolada.

EXEMPLO 2:

Neste exemplo, os harmônicos de corrente, ao invés de medição, serão obtidos a partir da simulação do circuito de uma ponte retificadora.

A figura 8 mostra o sistema a ser simulado, onde têm-se:

$$P_{dc} = V_{cc} \cdot I_d$$

$$I_d = 11600 \text{ [A]}$$

Os valores dos parâmetros do circuito mostrado estão referidos ao nível de tensão de 480 [Volts]. O transformador, para efeito de simulação, foi modelado através de uma resistência em série com uma indutância.

Os níveis de tensão das barras são:

$$F \quad \rightarrow \quad 4160 \text{ [Volts]}$$

$$B8 \quad \rightarrow \quad 4160 \text{ [Volts]}$$

$$2 \quad \rightarrow \quad 480 \text{ [Volts]}$$

Estes valores, juntamente com uma potência de 100 [MVA] são usados como base, resultando:



$S_{base} = 100$ [MVA]
 $U_{base} = 4160$ [Volts]
 $I_{base} = 13878,6$ [A]
 $Z_{base} = 0,173056$ [Ω]

$S_{base} = 100$ [MVA]
 $U_{base} = 480$ [Volts]
 $I_{base} = 120281,3$ [A]
 $Z_{base} = 0,002304$ [Ω]

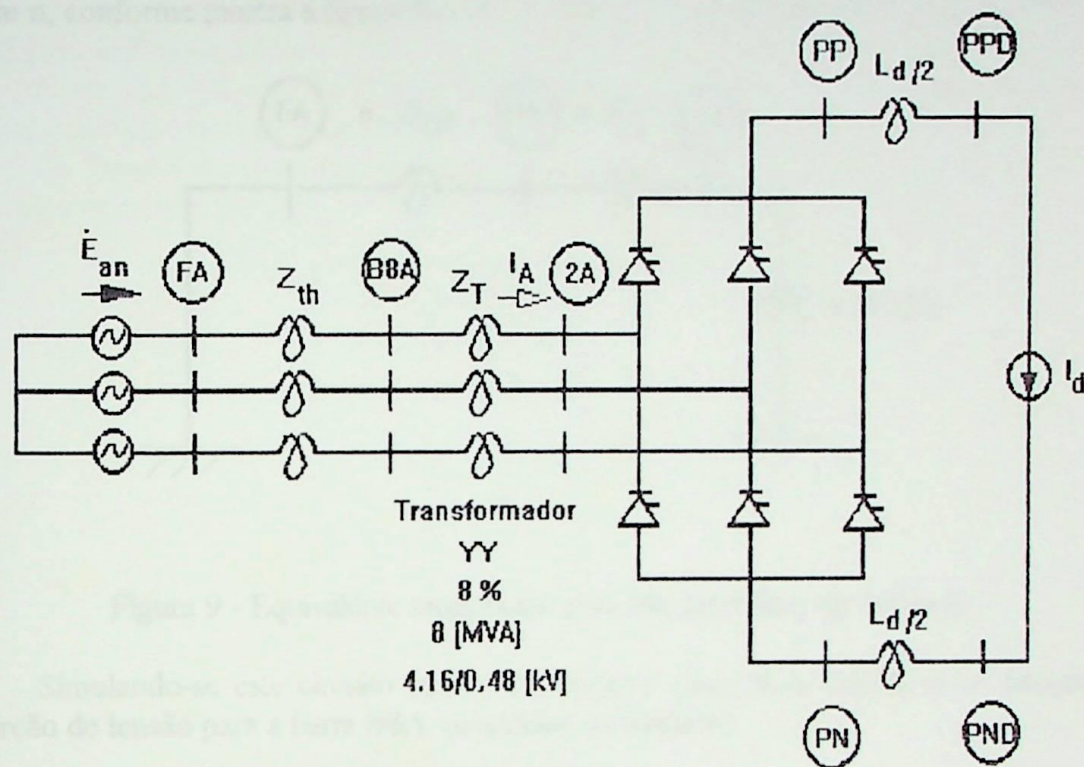


Figura 8 - Circuito com uma ponte retificadora para simulação.

Assim, os parâmetros do lado AC do circuito são:

$$Z_{TH} = j.0,0865 [\Omega] = j.0,5 [\text{P.U.}]$$

$$Z_T = 0,1731 [\Omega] = j.1,0 [\text{P.U.}]$$

$$E = 491,3 [\text{Volts}] = 1,023 [\text{P.U.}]$$

$$E_{an} = 283,65 [\text{Volts}] = 1,023 [\text{P.U.}]$$

Simulando-se o circuito no MICROTRAN (anexo 12, arquivo ponte1.dat) e em seguida, fazendo-se uma análise em série trigonométrica de Fourier, através do programa HARMONIC (anexo 13, arquivo ponte1.sai), vêm:

$I_1 = 8878,11$ [A] = $7,381E-2$ [P.U.]	$I_{10} = 278,98$ [A] = $2,319E-3$ [P.U.]
$I_2 = 320,474$ [A] = $2,664E-3$ [P.U.]	$I_{11} = 724,47$ [A] = $6,023E-3$ [P.U.]
$I_3 = 286,872$ [A] = $2,385E-3$ [P.U.]	$I_{12} = 245,88$ [A] = $2,044E-3$ [P.U.]
$I_4 = 312,82$ [A] = $2,601E-3$ [P.U.]	$I_{13} = 326,73$ [A] = $2,716E-3$ [P.U.]
$I_5 = 1842,60$ [A] = $1,532E-2$ [P.U.]	$I_{14} = 256,26$ [A] = $2,131E-3$ [P.U.]
$I_6 = 279,65$ [A] = $2,325E-3$ [P.U.]	$I_{15} = 222,46$ [A] = $1,850E-3$ [P.U.]
$I_7 = 1009,04$ [A] = $8,389E-3$ [P.U.]	$I_{16} = 224,86$ [A] = $1,870E-3$ [P.U.]
$I_8 = 300,52$ [A] = $2,498E-3$ [P.U.]	$I_{17} = 322,16$ [A] = $2,678E-3$ [P.U.]



$$I_9 = 264,15 \text{ [A]} = 2,196\text{E-}3 \text{ [P.U.]}$$

$$I_{18} = 196,43 \text{ [A]} = 1,633\text{E-}3 \text{ [P.U.]}$$

$$I_{19} = 64,55 \text{ [A]} = 5,367\text{E-}4 \text{ [P.U.]}$$

Com isto, pode-se montar o circuito equivalente monofásico para um harmônico de ordem n , conforme mostra a figura 9:

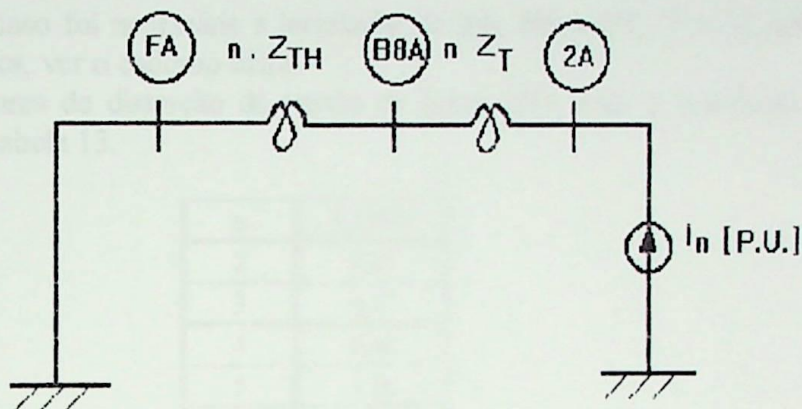


Figura 9 - Equivalente monofásico para um harmônico de ordem n .

Simulando-se este circuito (anexo 14, arquivo caso2.dat), calcula-se os fatores de distorção de tensão para a barra B8A, mostrados na tabela 12.

n	F.D(%)
2	0,260
3	0,349
4	0,508
5	3,744
6	0,681
7	2,864
8	0,977
9	0,966
10	1,134
11	3,236
12	1,206
13	1,730
14	1,369
15	1,359
16	1,466
17	2,229
18	1,437
19	0,499
Total	7,39

Tabela 12 - Fatores de distorção de tensão antes da instalação dos filtros.



Comparando-se este resultado com a norma IEEE STD 519-1992, mostrada no capítulo I (nos níveis de tensão do sistema analisado, máximo de 3% para fator individual de distorção de tensão e 5% para fator total de distorção de tensão), observa-se que o fator de distorção de tensão total ultrapassa o máximo permitido, bem como o fator individual de distorção de tensão para o 5º harmônico.

Neste caso foi necessária a instalação de três filtros (5º, 7º e 11 harmônicos). Para maiores detalhes, ver o caderno extra.

Os fatores de distorção de tensão da barra B8A após a instalação dos filtros são mostrados na tabela 13.

n	F.D(%)
2	0,27
3	0,37
4	0,60
5	1,76
6	0,68
7	1,38
8	0,81
9	0,92
10	1,48
11	1,22
12	0,77
13	1,24
14	1,10
15	1,05
16	1,15
17	1,77
18	1,15
19	0,40
Total	4,65

Tabela 13 - Fatores de distorção de tensão após a instalação dos filtros.

O espectro de harmônicos (de tensão da barra B8A) antes e após a instalação dos filtros é mostrado na figura 10.

A especificação dos filtros então fica:

Filtro de 5º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

- . Duas unidades de 2300 [Volts] e 200 [kVAr], em série com
- . Quatro unidades em série de 380 [Volts] e 7,5 [kVAr].



Assim:

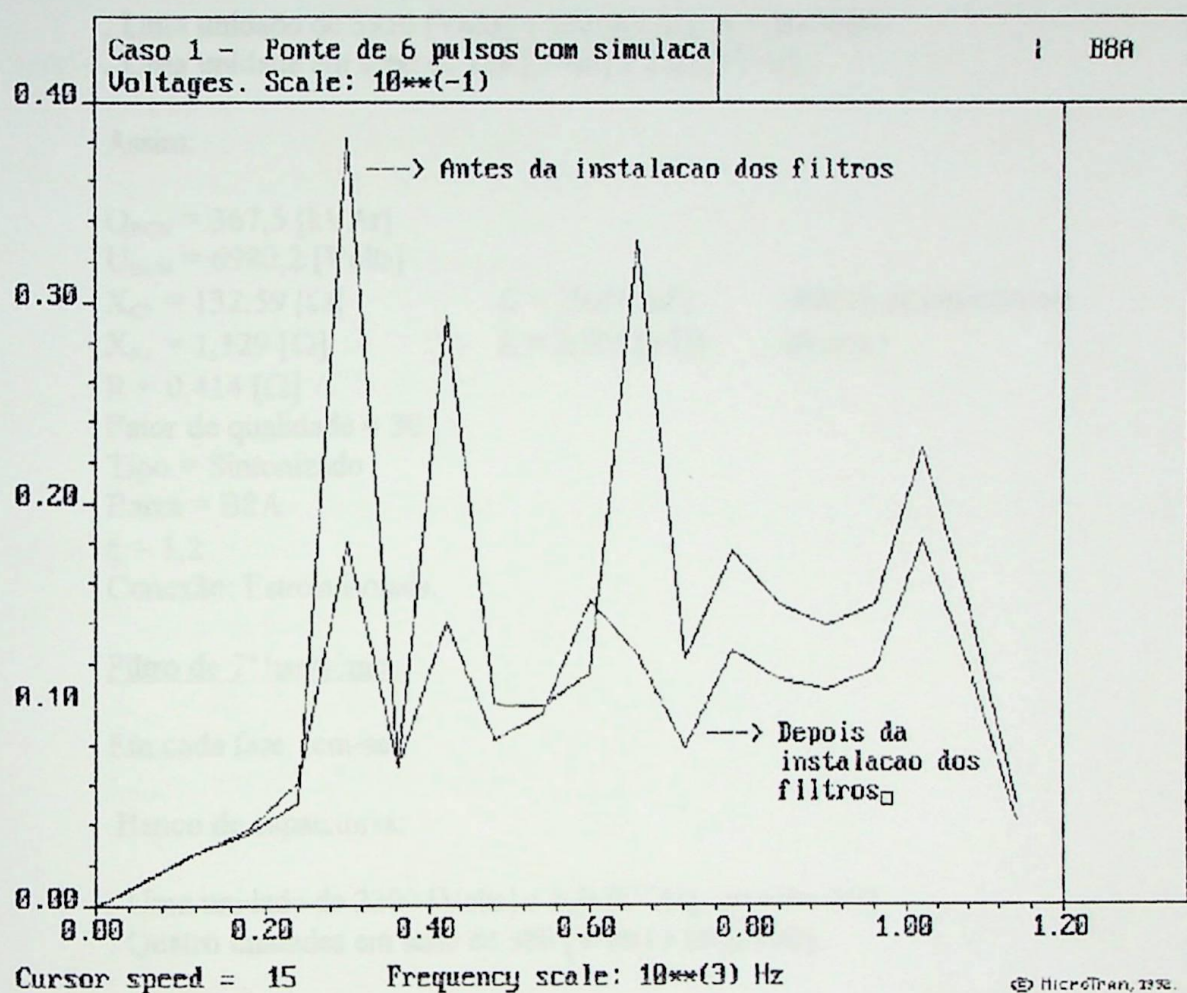


Figura 10 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B8A antes e após a colocação dos filtros.

$$Q_{BCN} = 1190 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 6614,4 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 33,92 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 78,20 \text{ [\mu F]}$$

(Banco de capacitores)

$$X_{RI} = 1,40 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 3,71 \text{ [mH]}$$

(Reator)

$$R = 0,23 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B8A

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 11º harmônico:

Em cada fase, tem-se:



Banco de capacitores:

- . Uma unidade de 3810 [Volts] e 100 [kVAr], em série com
- . Uma unidade em série de 220 [Volts] e 22,5 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 367,5 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 6980,2 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 132,59 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 20,01 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{RI} = 1,129 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 2,995 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,414 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B8A

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 7º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

- . Uma unidade de 2300 [Volts] e 100 [kVAr], em série com
- . Quatro unidades em série de 380 [Volts] e 20 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 540 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 6614,4 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 81,019 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 32,74 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{RI} = 1,691 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 4,49 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,396 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B8A

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Não há nenhum problema de ressonância na retirada de qualquer dos filtros.

EXEMPLO 3:



Este exemplo é utilizado para mostrar no capítulo V, que o programa MTFILTRO trabalha também com o modelo de transformador do MICROTRAN e não apenas com o modelo RL utilizado no exemplo anterior.

O circuito trifásico a ser analisado está mostrado na figura 11. Assim, têm-se os valores:

$$I_d = 11600 \text{ [A]}$$

$$Z_{TH} = 0,5 \text{ [P.U.]} = 0,086528 \text{ [\Omega]}$$

$$E_{TH} = 1,023 \text{ [P.U.]} = 4255,68 \text{ [Volts]}$$

Os níveis de tensão do sistema são:

$$\begin{array}{lll} F & \rightarrow & 4160 \text{ [Volts]} \\ B8 & \rightarrow & 4160 \text{ [Volts]} \\ 2 & \rightarrow & 480 \text{ [Volts]} \end{array}$$

A barra 3A mostrada na figura 11 é fictícia. Ela serve apenas para o monitoramento da corrente I mostrada.

Valores de base:

$S_{base} = 100 \text{ [MVA]}$	$S_{base} = 100 \text{ [MVA]}$
$U_{base} = 4160 \text{ [Volts]}$	$U_{base} = 480 \text{ [Volts]}$
$I_{base} = 13878,6 \text{ [A]}$	$I_{base} = 120281,3 \text{ [A]}$
$Z_{base} = 0,173056 \text{ [\Omega]}$	$Z_{base} = 0,002304 \text{ [\Omega]}$

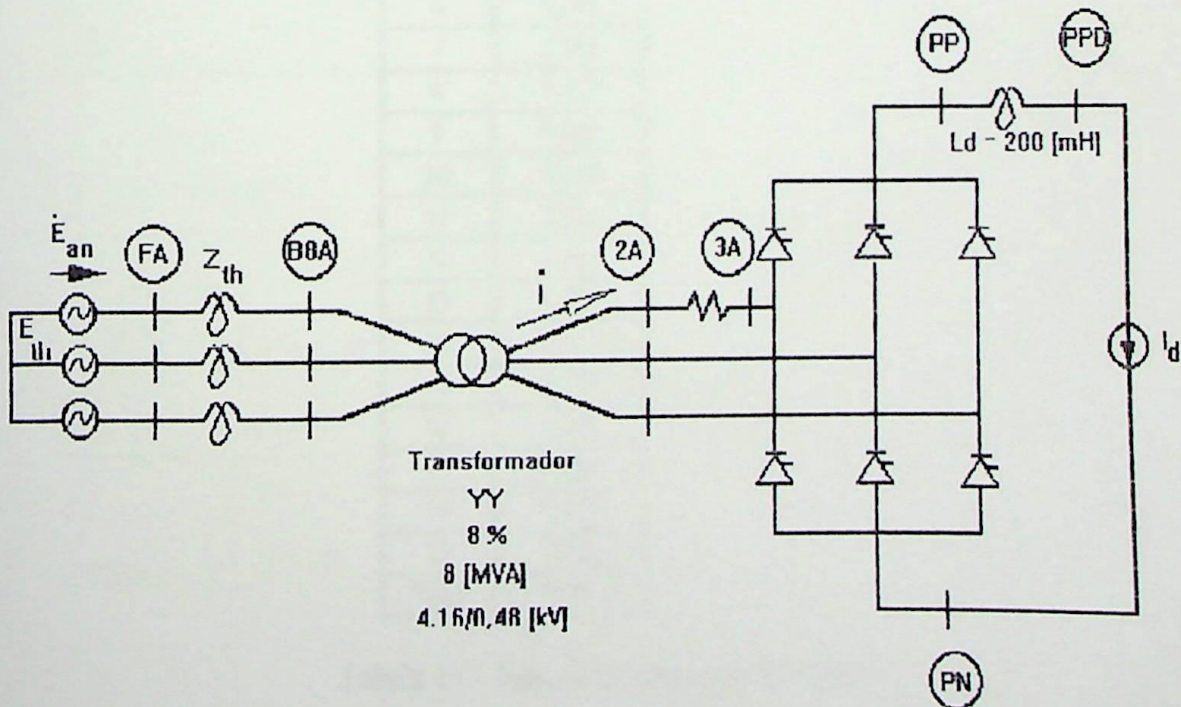


Figura 11 - Ponte retificadora de 6 pulsos.



Simulando-se o circuito da última figura no MICROTRAN (anexo 15, arquivo ttt.dat) e em seguida utilizando o programa HARMONIC para fazer uma análise em série trigonométrica de Fourier da corrente I, obtêm-se os seguintes valores:

$I_1 = 8878,12$ [A] = $7,381E-2$ [P.U.]	$I_{11} = 724,40$ [A] = $6,023E-3$ [P.U.]
$I_2 = 320,52$ [A] = $2,665E-3$ [P.U.]	$I_{12} = 245,90$ [A] = $2,044E-3$ [P.U.]
$I_3 = 286,942$ [A] = $2,386E-3$ [P.U.]	$I_{13} = 326,65$ [A] = $2,716E-3$ [P.U.]
$I_4 = 312,86$ [A] = $2,601E-3$ [P.U.]	$I_{14} = 256,25$ [A] = $2,130E-3$ [P.U.]
$I_5 = 1842,58$ [A] = $1,532E-2$ [P.U.]	$I_{15} = 222,45$ [A] = $1,849E-3$ [P.U.]
$I_6 = 279,68$ [A] = $2,325E-3$ [P.U.]	$I_{16} = 224,97$ [A] = $1,870E-3$ [P.U.]
$I_7 = 1008,98$ [A] = $8,388E-3$ [P.U.]	$I_{17} = 322,08$ [A] = $2,678E-3$ [P.U.]
$I_8 = 300,58$ [A] = $2,499E-3$ [P.U.]	$I_{18} = 196,38$ [A] = $1,633E-3$ [P.U.]
$I_9 = 264,17$ [A] = $2,196E-3$ [P.U.]	$I_{19} = 64,48$ [A] = $5,361E-4$ [P.U.]
$I_{10} = 279,00$ [A] = $2,320E-3$ [P.U.]	

Com isto, pode-se montar o circuito monofásico mostrado na figura 9 (anexo 16, arquivo caso3.dat), simular no MICROTRAN e calcular os fatores de distorção de tensão para a barra B8A, que são mostrados na tabela 14.

n	F.D(%)
2	0,260
3	0,349
4	0,508
5	3,744
6	0,681
7	2,864
8	0,977
9	0,966
10	1,134
11	3,236
12	1,206
13	1,730
14	1,369
15	1,359
16	1,466
17	2,229
18	1,437
19	0,499
Total	7,39

Tabela 14 - Fatores de distorção de tensão.

Estes fatores de distorção de tensão são os mesmos verificados no caso anterior. Portanto as especificações dos filtros estão mostradas no exemplo 2.



EXEMPLO 4:

Seja um sistema com o diagrama unifilar e o diagrama para o estudo de harmônicos mostrados nas páginas seguintes.

Simplificando o diagrama para um harmônico de ordem n , tem-se a figura 14.

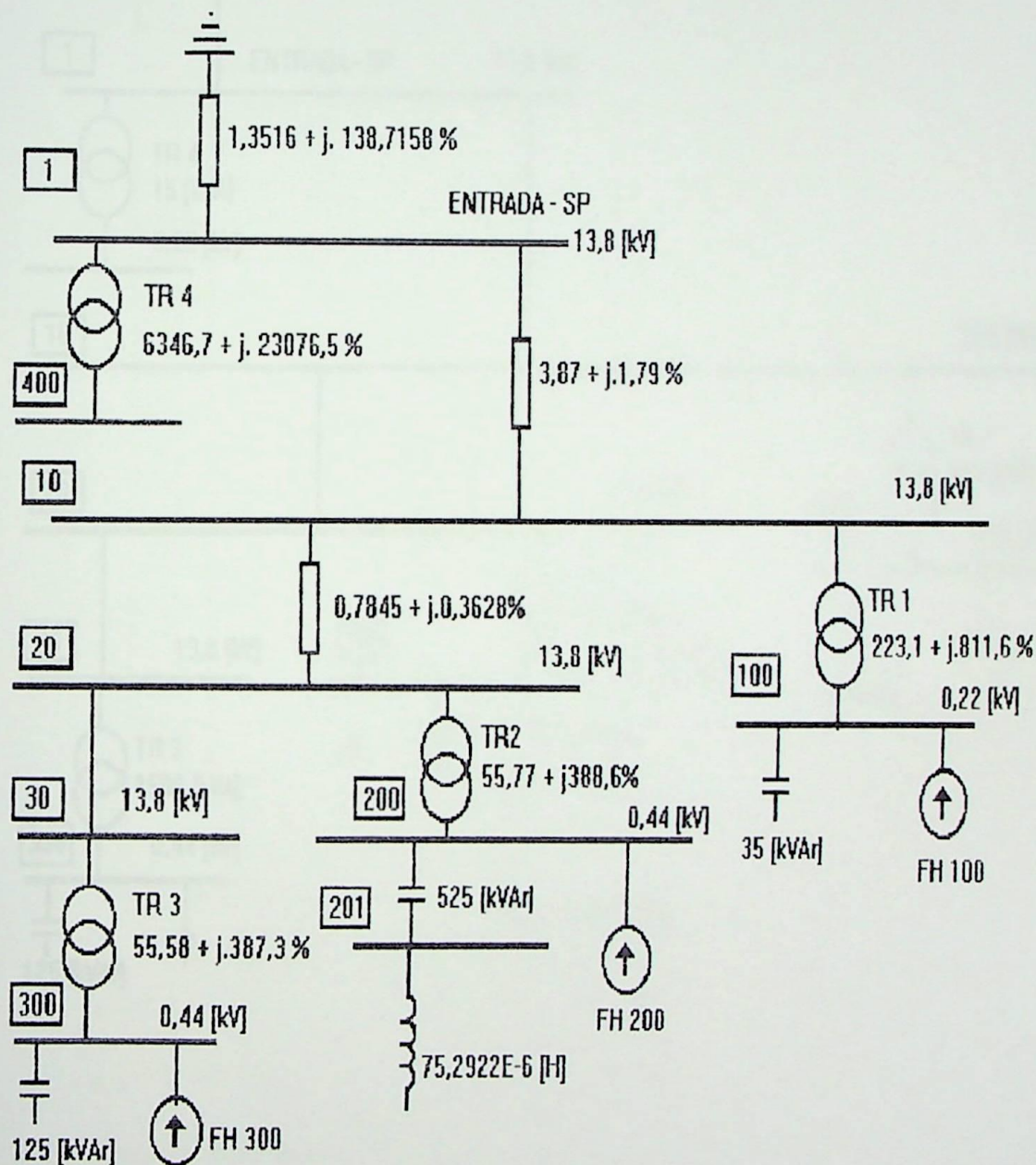


Figura 12 - Diagrama unifilar para o estudo de harmônicos.

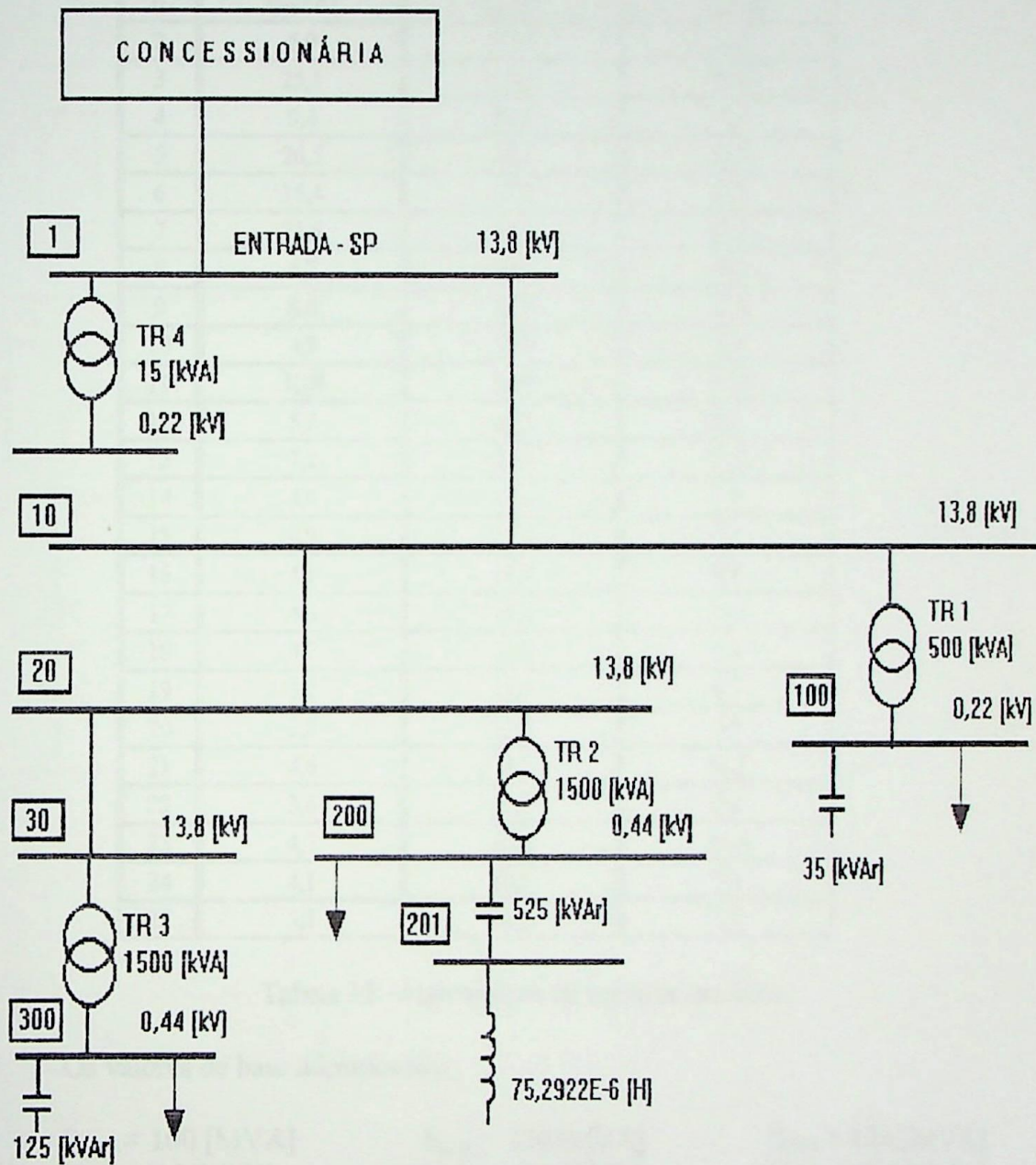


Figura 13 - Diagrama unifilar



Os valores dos harmônicos de corrente obtidos através de medição são mostrados na tabela 15.

n	I_{100} [A]	I_{200} [A]	I_{300} [A]
2	6,9	217,6	34,0
3	25,1	220,0	37,4
4	5,4	84,2	17,4
5	26,5	96,7	33,0
6	16,4	29,3	10,2
7	21,9	53,4	19,2
8	6,7	40,9	10,3
9	8,0	28,3	10,6
10	4,8	18,9	8,3
11	10,8	36,5	17,9
12	5,2	21,1	8,1
13	7,2	21,5	22,3
14	4,6	14,0	9,5
15	4,9	17,0	12,1
16	4,1	16,9	9,8
17	4,3	19,3	13,1
18	4,7	13,0	9,1
19	5,2	11,9	6,7
20	3,8	11,9	5,8
21	4,6	13,5	12,5
22	3,6	11,0	8,2
23	4,7	15,4	17,4
24	4,1	10,5	7,2
25	5,1	12,3	7,9

Tabela 15 - Harmônicos de corrente medidos.

Os valores de base adotados são:

$$S_{\text{base}} = 100 \text{ [MVA]}$$

$$U_{\text{base}} = 13,8 \text{ [kV]}$$

$$I_{\text{base}} = 4183,7 \text{ [A]}$$

$$Z_{\text{base}} = 1,9044 \text{ } [\Omega]$$

$$S_{\text{base}} = 100 \text{ [MVA]}$$

$$U_{\text{base}} = 440 \text{ [Volts]}$$

$$I_{\text{base}} = 131216,0 \text{ [A]}$$

$$Z_{\text{base}} = 0,001936 \text{ } [\Omega]$$

$$S_{\text{base}} = 100 \text{ [MVA]}$$

$$U_{\text{base}} = 220 \text{ [Volts]}$$

$$I_{\text{base}} = 262431,9 \text{ [A]}$$

$$Z_{\text{base}} = 0,000484 \text{ } [\Omega]$$

Assim, os harmônicos de corrente da tabela 15, são mostrados na tabela 16 em valores por unidade [P.U.]

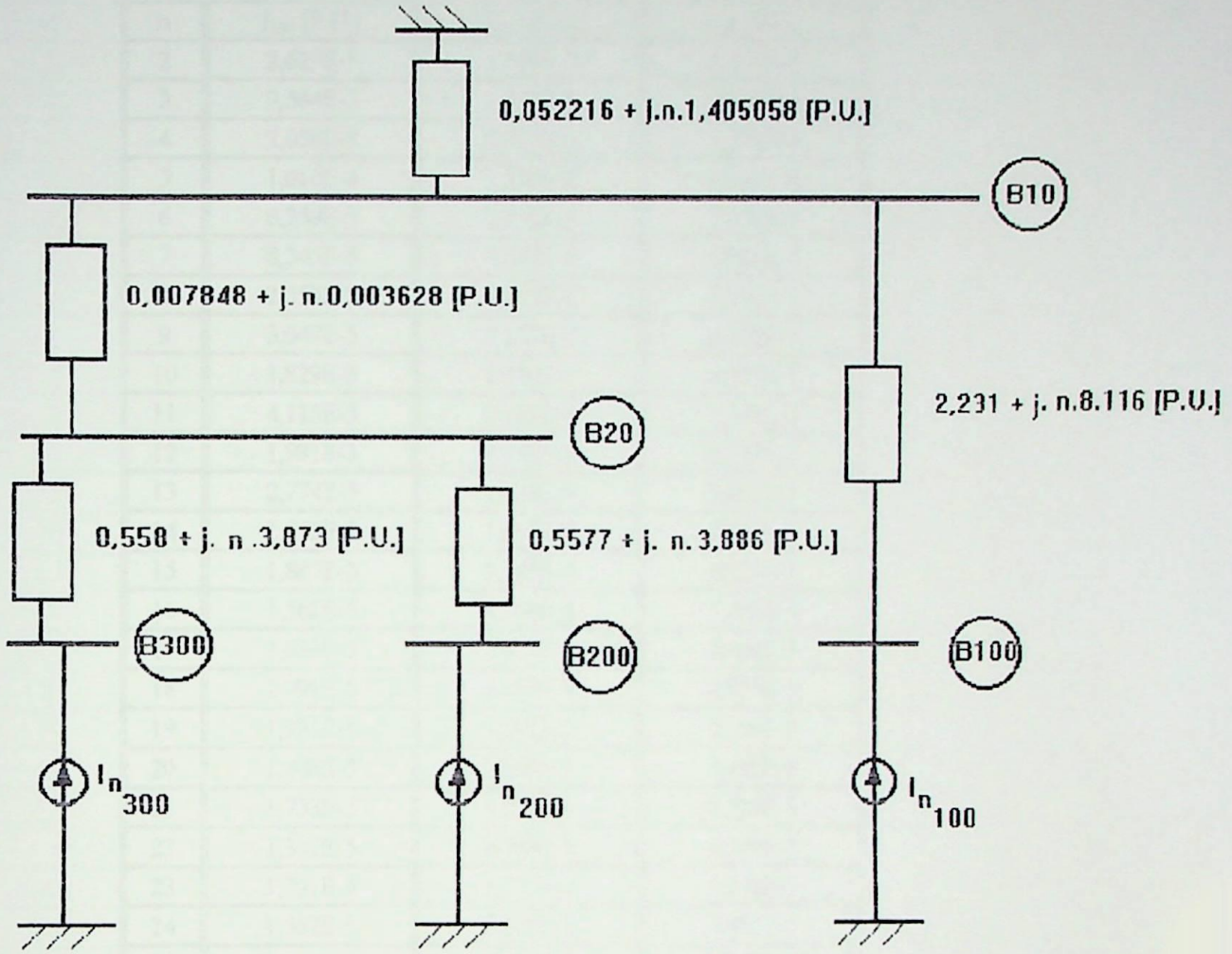


Figura 14 - Diagrama simplificado para um harmônico de ordem n.



n	I_{100} [P.U.]	I_{200} [P.U.]	I_{300} [P.U.]
2	2,629E-5	1,658E-3	2,591E-4
3	9,564E-5	1,677E-3	2,850E-4
4	2,058E-5	6,414E-4	1,326E-4
5	1,010E-4	7,370E-4	2,515E-4
6	6,250E-5	2,233E-4	7,773E-5
7	8,345E-5	4,070E-4	1,463E-4
8	2,553E-5	3,117E-4	7,850E-5
9	3,048E-5	2,157E-4	8,078E-5
10	1,829E-5	1,440E-4	6,325E-5
11	4,115E-5	2,782E-4	1,364E-4
12	1,981E-5	1,608E-4	6,173E-5
13	2,774E-5	1,639E-4	1,669E-4
14	1,753E-5	1,067E-4	7,240E-5
15	1,867E-5	1,296E-4	9,221E-5
16	1,562E-5	1,288E-4	7,469E-5
17	1,639E-5	1,471E-4	9,984E-5
18	1,791E-5	9,907E-5	6,935E-5
19	1,981E-5	9,069E-5	5,106E-5
20	1,448E-5	9,069E-5	4,420E-5
21	1,753E-5	1,029E-4	9,526E-5
22	1,372E-5	8,383E-5	6,249E-5
23	1,791E-5	1,174E-4	5,640E-5
24	1,562E-5	8,002E-5	5,487E-5
25	1,943E-5	9,374E-5	6,021E-5

Tabela 16 - Harmônicos de corrente medidos, em valores por unidade.

Com estes valores, simulando-se o circuito mostrado na última figura (anexo 17, arquivo caso4.dat), podem-se calcular os fatores de distorção de tensão para as barras. Obtêm-se assim, estimando a tensão à frequência fundamental de 1 [P.U.], os valores mostrados na tabela 17.



n	B10	B20	B100	B200	B300
2	0,55	0,55	0,59	1,84	0,75
3	0,87	0,87	1,10	2,83	1,20
4	0,55	0,55	1,22	1,55	0,76
5	0,77	0,77	1,18	2,20	1,25
6	0,31	0,31	0,61	0,83	0,49
7	0,63	0,63	1,10	1,73	1,02
8	0,47	0,47	0,63	1,44	0,71
9	0,41	0,41	0,64	1,17	0,70
10	0,32	0,32	0,47	0,88	0,56
11	0,70	0,71	1,07	1,89	1,29
12	0,41	0,41	0,60	1,16	0,70
13	0,66	0,66	0,95	1,49	1,52
14	0,39	0,39	0,59	0,97	0,78
15	0,51	0,51	0,73	1,26	1,04
16	0,49	0,49	0,70	1,29	0,96
17	0,63	0,63	0,86	1,60	1,29
18	0,47	0,47	0,73	1,17	0,96
19	0,43	0,43	0,74	1,10	1,81
20	0,42	0,42	0,65	1,13	0,76
21	0,64	0,64	0,94	1,48	1,41
22	0,49	0,50	0,74	1,21	1,03
23	0,62	0,62	0,95	1,67	1,12
24	0,51	0,51	0,81	1,26	1,02
25	0,61	0,61	1,00	1,52	1,19
Total	2,70	2,71	4,13	7,39	4,95

Tabela 17 - Fatores de distorção de tensão antes da instalação dos filtros.

Comparando com a norma IEEE STD 519 - 1992 (nos níveis de tensão do sistema, máximo de 3% para fatores individuais de distorção de tensão e 5% para fatores totais de distorção de tensão), vê-se que o fator de distorção total de tensão para a barra B200 está acima do máximo permitido pela norma adotada.

Após a instalação dos filtros, têm-se os fatores de distorção de tensão para as barras do sistema mostrados na tabela 18.

O espectro de harmônicos de tensão na barra B200 antes e após a colocação dos filtros é mostrado na figura 15.



n	B300	B200	B100
2	0,54	1,08	0,38
3	0,69	0,97	0,59
4	0,71	1,36	1,17
5	0,93	1,04	0,85
6	0,45	0,68	0,57
7	0,81	0,94	0,88
8	0,62	1,08	0,54
9	0,64	0,95	0,58
10	0,54	0,79	0,44
11	1,06	1,05	0,84
12	0,61	0,82	0,51
13	1,42	1,10	0,85
14	0,72	0,73	0,52
15	0,97	0,97	0,66
16	0,88	1,00	0,62
17	1,20	1,25	0,76
18	0,89	0,91	0,67
19	0,75	0,86	0,67
20	0,70	0,89	0,59
21	1,33	1,16	0,85
22	0,96	0,96	0,67
23	1,03	1,32	0,86
24	0,95	0,99	0,74
25	1,11	1,20	0,92
Total	4,36	4,99	3,53

Tabela 18 - Fatores de distorção de tensão após a instalação dos filtros.

Para as barras B300 e B100, os espectros de harmônicos antes e após a instalação dos filtros são mostradas nas figuras 16 e 17.

A especificação dos filtros então fica:

Filtro de 3^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores

.Três unidades em paralelo de 380 [Volts] e 150 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 450 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{DCN} = 658,18 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 0,963 \text{ } [\Omega]$$

$$C = 2754,5 \text{ } [\mu\text{F}] \quad (\text{Banco de capacitores})$$



n	I ₁₀₀ [P.U.]	I ₂₀₀ [P.U.]	I ₃₀₀ [P.U.]
2	2,629E-5	1,658E-3	2,591E-4
3	9,564E-5	1,677E-3	2,850E-4
4	2,058E-5	6,414E-4	1,326E-4
5	1,010E-4	7,370E-4	2,515E-4
6	6,250E-5	2,233E-4	7,773E-5
7	8,345E-5	4,070E-4	1,463E-4
8	2,553E-5	3,117E-4	7,850E-5
9	3,048E-5	2,157E-4	8,078E-5
10	1,829E-5	1,440E-4	6,325E-5
11	4,115E-5	2,782E-4	1,364E-4
12	1,981E-5	1,608E-4	6,173E-5
13	2,774E-5	1,639E-4	1,669E-4
14	1,753E-5	1,067E-4	7,240E-5
15	1,867E-5	1,296E-4	9,221E-5
16	1,562E-5	1,288E-4	7,469E-5
17	1,639E-5	1,471E-4	9,984E-5
18	1,791E-5	9,907E-5	6,935E-5
19	1,981E-5	9,069E-5	5,106E-5
20	1,448E-5	9,069E-5	4,420E-5
21	1,753E-5	1,029E-4	9,526E-5
22	1,372E-5	8,383E-5	6,249E-5
23	1,791E-5	1,174E-4	5,640E-5
24	1,562E-5	8,002E-5	5,487E-5
25	1,943E-5	9,374E-5	6,021E-5

Tabela 16 - Harmônicos de corrente medidos, em valores por unidade.

Com estes valores, simulando-se o circuito mostrado na última figura (anexo 17, arquivo caso4.dat), podem-se calcular os fatores de distorção de tensão para as barras. Obtêm-se assim, estimando a tensão à frequência fundamental de 1 [P.U.], os valores mostrados na tabela 17.



n	B10	B20	B100	B200	B300
2	0,55	0,55	0,59	1,84	0,75
3	0,87	0,87	1,10	2,83	1,20
4	0,55	0,55	1,22	1,55	0,76
5	0,77	0,77	1,18	2,20	1,25
6	0,31	0,31	0,61	0,83	0,49
7	0,63	0,63	1,10	1,73	1,02
8	0,47	0,47	0,63	1,44	0,71
9	0,41	0,41	0,64	1,17	0,70
10	0,32	0,32	0,47	0,88	0,56
11	0,70	0,71	1,07	1,89	1,29
12	0,41	0,41	0,60	1,16	0,70
13	0,66	0,66	0,95	1,49	1,52
14	0,39	0,39	0,59	0,97	0,78
15	0,51	0,51	0,73	1,26	1,04
16	0,49	0,49	0,70	1,29	0,96
17	0,63	0,63	0,86	1,60	1,29
18	0,47	0,47	0,73	1,17	0,96
19	0,43	0,43	0,74	1,10	1,81
20	0,42	0,42	0,65	1,13	0,76
21	0,64	0,64	0,94	1,48	1,41
22	0,49	0,50	0,74	1,21	1,03
23	0,62	0,62	0,95	1,67	1,12
24	0,51	0,51	0,81	1,26	1,02
25	0,61	0,61	1,00	1,52	1,19
Total	2,70	2,71	4,13	7,39	4,95

Tabela 17 - Fatores de distorção de tensão antes da instalação dos filtros.

Comparando com a norma IEEE STD 519 - 1992 (nos níveis de tensão do sistema, máximo de 3% para fatores individuais de distorção de tensão e 5% para fatores totais de distorção de tensão), vê-se que o fator de distorção total de tensão para a barra B200 está acima do máximo permitido pela norma adotada.

Após a instalação dos filtros, têm-se os fatores de distorção de tensão para as barras do sistema mostrados na tabela 18.

O espectro de harmônicos de tensão na barra B200 antes e após a colocação dos filtros é mostrado na figura 15.



n	B300	B200	B100
2	0,54	1,08	0,38
3	0,69	0,97	0,59
4	0,71	1,36	1,17
5	0,93	1,04	0,85
6	0,45	0,68	0,57
7	0,81	0,94	0,88
8	0,62	1,08	0,54
9	0,64	0,95	0,58
10	0,54	0,79	0,44
11	1,06	1,05	0,84
12	0,61	0,82	0,51
13	1,42	1,10	0,85
14	0,72	0,73	0,52
15	0,97	0,97	0,66
16	0,88	1,00	0,62
17	1,20	1,25	0,76
18	0,89	0,91	0,67
19	0,75	0,86	0,67
20	0,70	0,89	0,59
21	1,33	1,16	0,85
22	0,96	0,96	0,67
23	1,03	1,32	0,86
24	0,95	0,99	0,74
25	1,11	1,20	0,92
Total	4,36	4,99	3,53

Tabela 18 - Fatores de distorção de tensão após a instalação dos filtros.

Para as barras B300 e B100, os espectros de harmônicos antes e após a instalação dos filtros são mostradas nas figuras 16 e 17.

A especificação dos filtros então fica:

Filtro de 3^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores

.Três unidades em paralelo de 380 [Volts] e 150 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 450 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 658,18 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 0,963 \text{ } [\Omega]$$

$$C = 2754,5 \text{ } [\mu\text{F}] \quad (\text{Banco de capacitores})$$

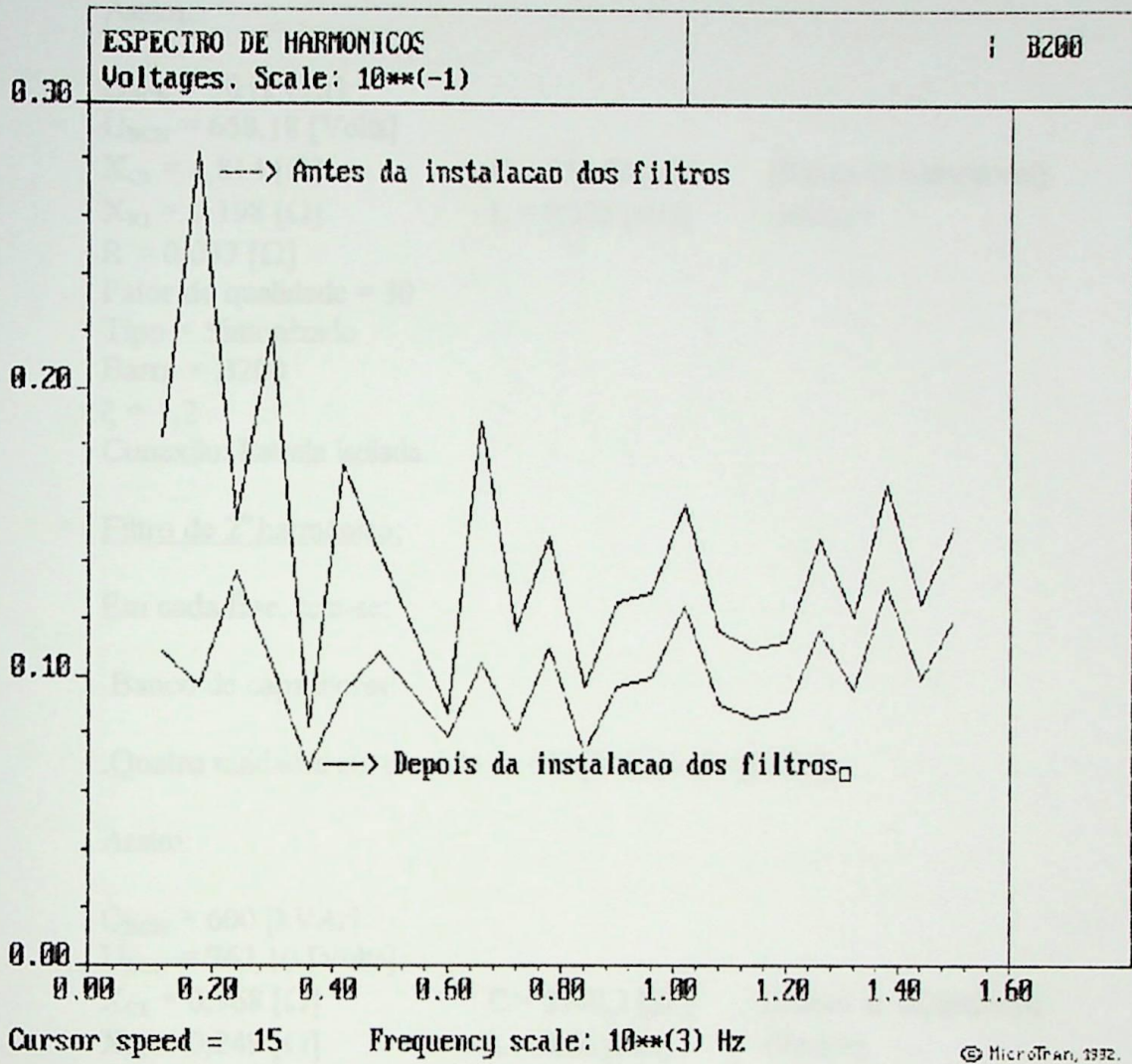


Figura 15 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B200 antes e após a instalação dos filtros.

$X_{RL} = 0,110 [\Omega]$ $L = 0,292 [\text{mH}]$ (Reator)
 $R = 0,011 [\Omega]$
Fator de qualidade = 30
Tipo - Sintonizado
Barra = B200
 $\xi = 1,2$
Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 5º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

Uma unidade de 380 [Volts] e 30 [kVAr].



Assim:

$$Q_{BCN} = 90 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 658,18 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 4,814 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 551,01 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{RI} = 0,198 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 0,525 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,033 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B200

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 2º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Quatro unidades em paralelo de 440 [Volts] e 50 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 600 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 762,10 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 0,968 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 2740,3 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{RI} = 0,249 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 0,66 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 0,017 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B200

$$\xi = 1,4$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 11º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Uma unidade de 440 [Volts] e 5 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 15 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 762,08 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 38,718 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 68,51 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

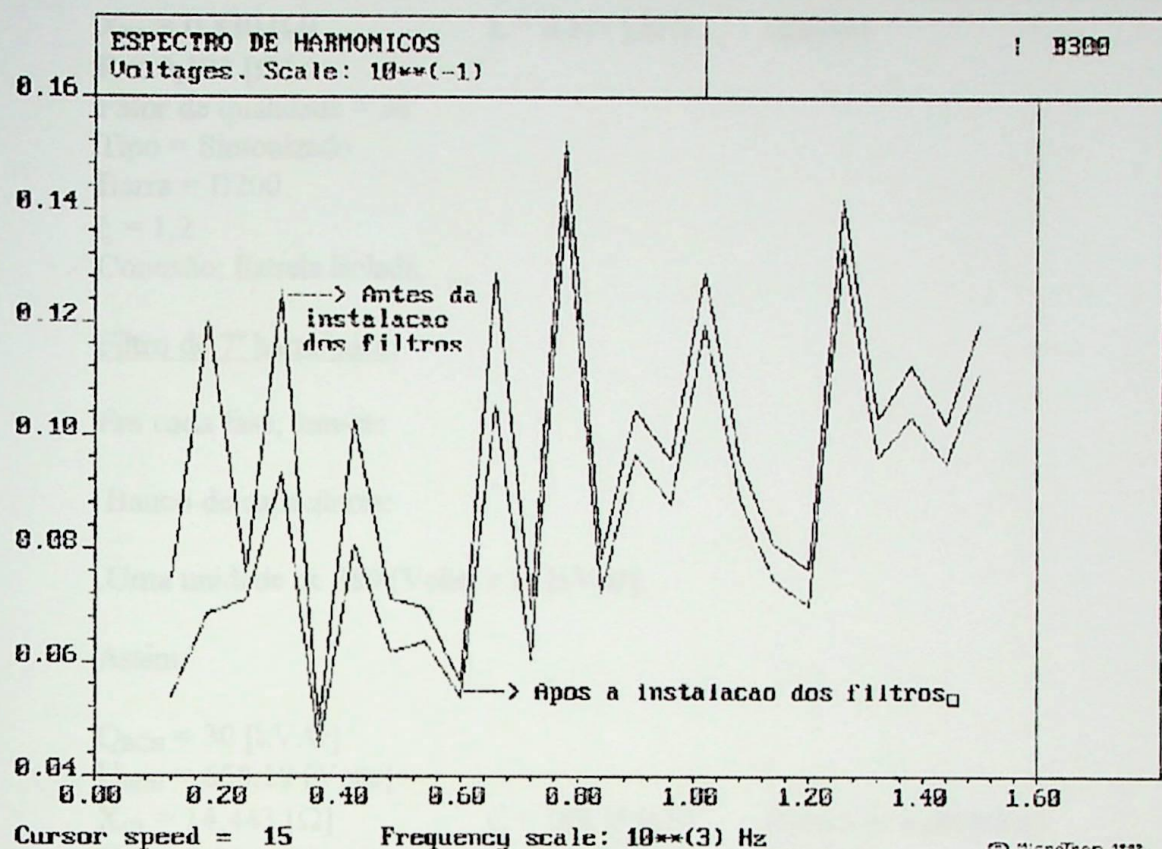


Figura 16 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B300

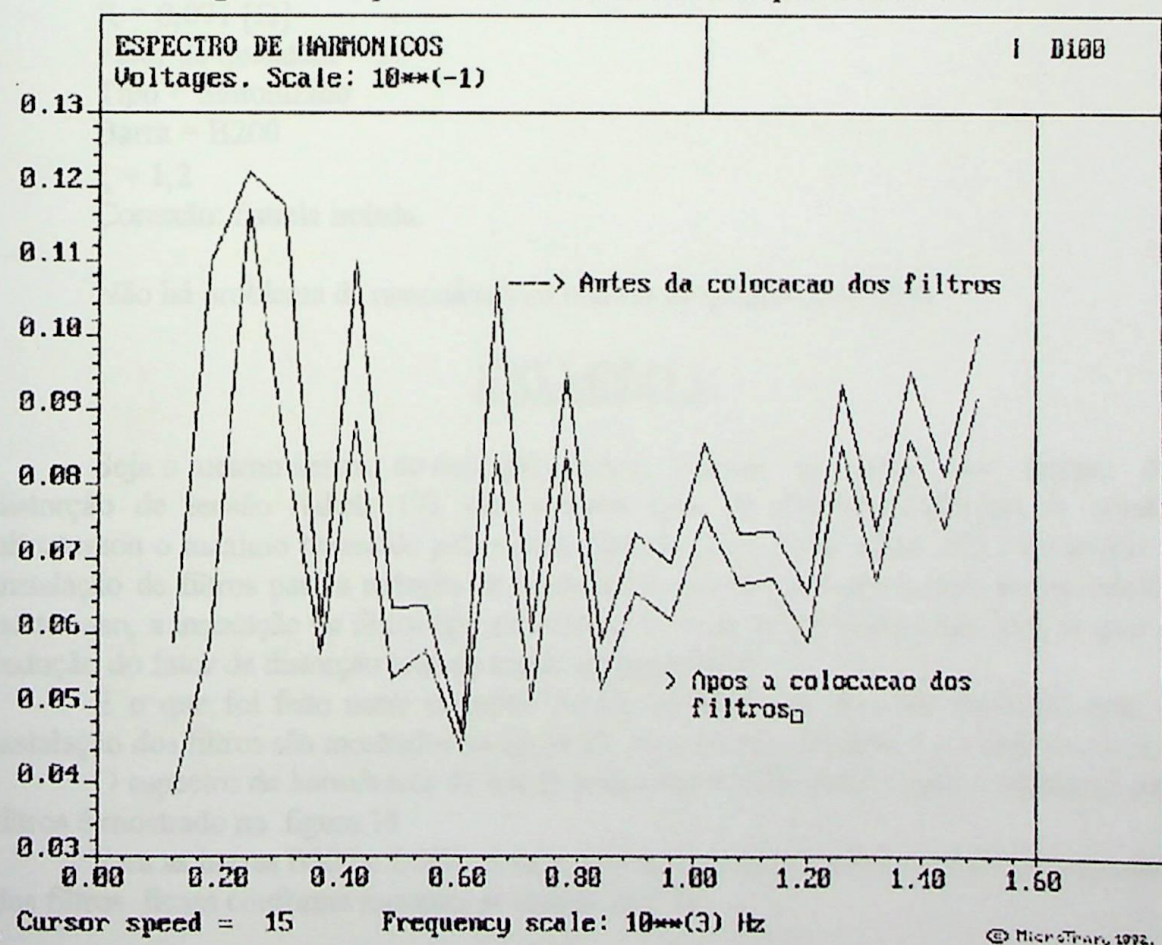


Figura 17 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B100 .



$$X_{R1} = 0,330 \text{ } [\Omega] \qquad L = 0,875 \text{ } [\text{mH}] \qquad (\text{Reator})$$

$$R = 0,121 \text{ } [\Omega]$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B200

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 7º harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Uma unidade de 380 [Volts] e 10 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 30 \text{ } [\text{kVAr}]$$

$$U_{BCN} = 658,18 \text{ } [\text{Volts}]$$

$$X_{C1} = 14,443 \text{ } [\Omega]$$

$$C = 183,66 \text{ } [\mu\text{F}] \qquad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 0,304 \text{ } [\Omega]$$

$$L = 0,806 \text{ } [\text{mH}] \qquad (\text{Reator})$$

$$R = 0,071 \text{ } [\Omega]$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B200

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Não há problema de ressonância na retirada de qualquer dos filtros.

EXEMPLO 5:

Seja o mesmo sistema do exemplo anterior. Nota-se na tabela dos fatores de distorção de tensão (tabela 17), que nenhum fator de distorção individual de tensão ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada (3%). Sendo assim, não é necessária a instalação de filtros para a redução de harmônicos específicos. Logo é mais recomendado, neste caso, a instalação de filtros tipo amortecido ao invés de tipo sintonizado, pois se quer a redução do fator de distorção total de tensão da barra B200.

É o que foi feito neste exemplo. Assim, os fatores de distorção de tensão após a instalação dos filtros são mostrados na tabela 19. Para maiores detalhes, ver o caderno extra.

O espectro de harmônicos de tensão para a barra B200 antes e após a colocação dos filtros é mostrado na figura 18

Para as barras B300 e B200, os espectros de harmônicos antes e depois da colocação dos filtros ficam conforme mostram as figuras 19 e 20.

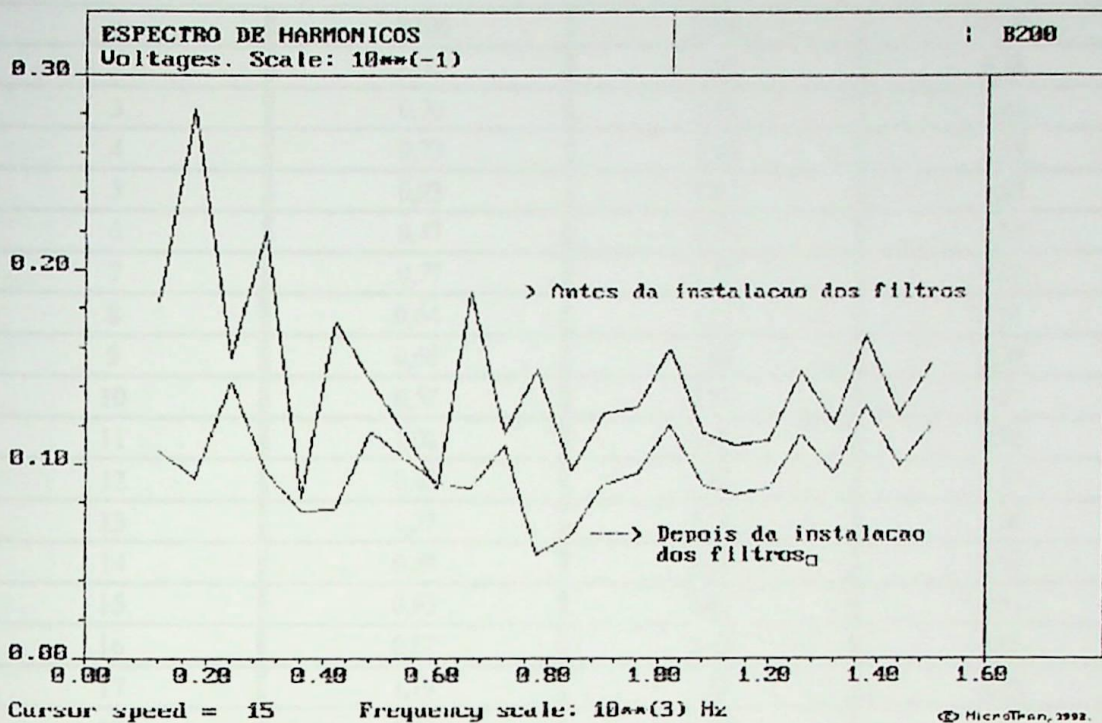


Figura 18 - Espectro de harmônicos de tensão na barra B200 antes e após a instalação dos filtros.

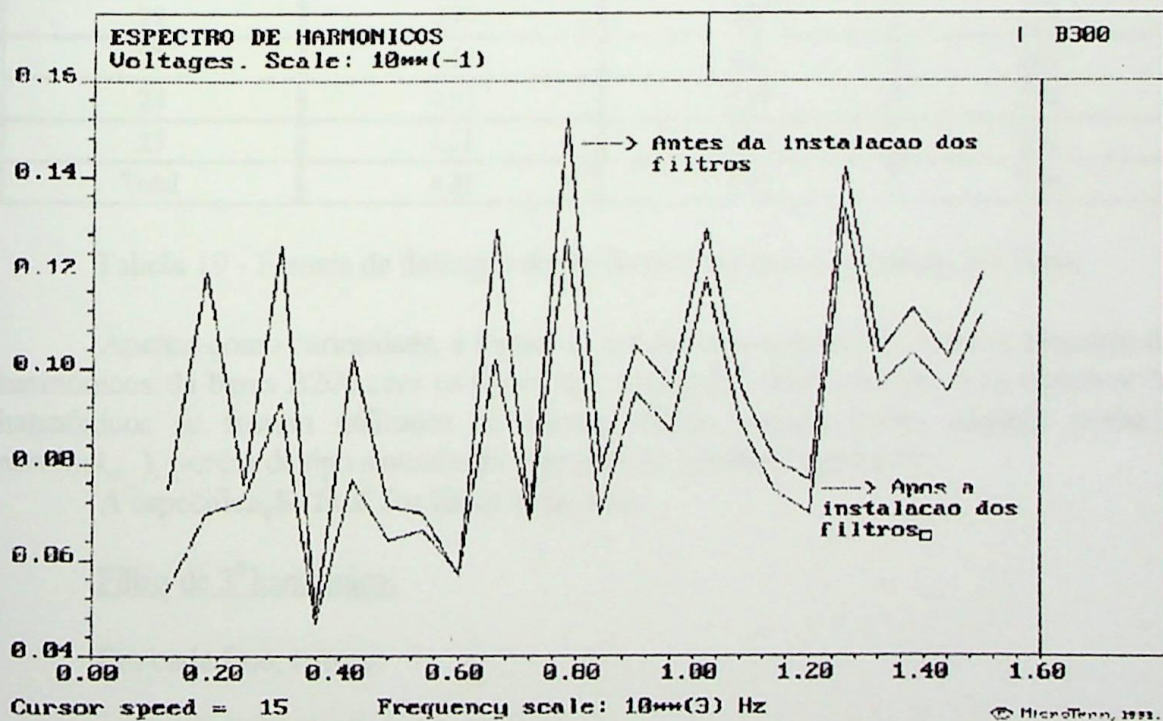


Figura 19 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B300 .



n	B300	B200	B100
2	0,54	1,07	0,38
3	0,70	0,93	0,60
4	0,73	1,43	1,19
5	0,93	0,97	0,85
6	0,47	0,76	0,59
7	0,77	0,77	0,84
8	0,64	1,17	0,56
9	0,66	1,04	0,60
10	0,57	0,91	0,47
11	1,02	0,88	0,80
12	0,68	1,10	0,59
13	1,27	0,53	0,70
14	0,69	0,63	0,50
15	0,95	0,90	0,64
16	0,87	0,95	0,61
17	1,19	1,21	0,75
18	0,89	0,89	0,66
19	0,74	0,85	0,67
20	0,70	0,87	0,59
21	1,33	1,15	0,85
22	0,99	0,95	0,67
23	1,03	1,31	0,86
24	0,95	0,99	0,74
25	1,11	1,20	0,92
Total	4,31	4,89	3,49

Tabela 19 - Fatores de distorção de tensão (em %) após a instalação dos filtros.

Apenas como curiosidade, a Figura 21 mostra uma comparação entre os espectros de harmônicos da barra B200 com os filtros tipo amortecido deste exemplo, e os espectros de harmônicos se fossem utilizados os mesmos filtros (mesma tensão nominal, potência nominal,...), porém de tipo sintonizado com fator de qualidade igual a 30.

A especificação final dos filtros então fica:

Filtro de 3^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

Duas unidades em paralelo de 380[Volts] e 50 [kVAr]

Assim:

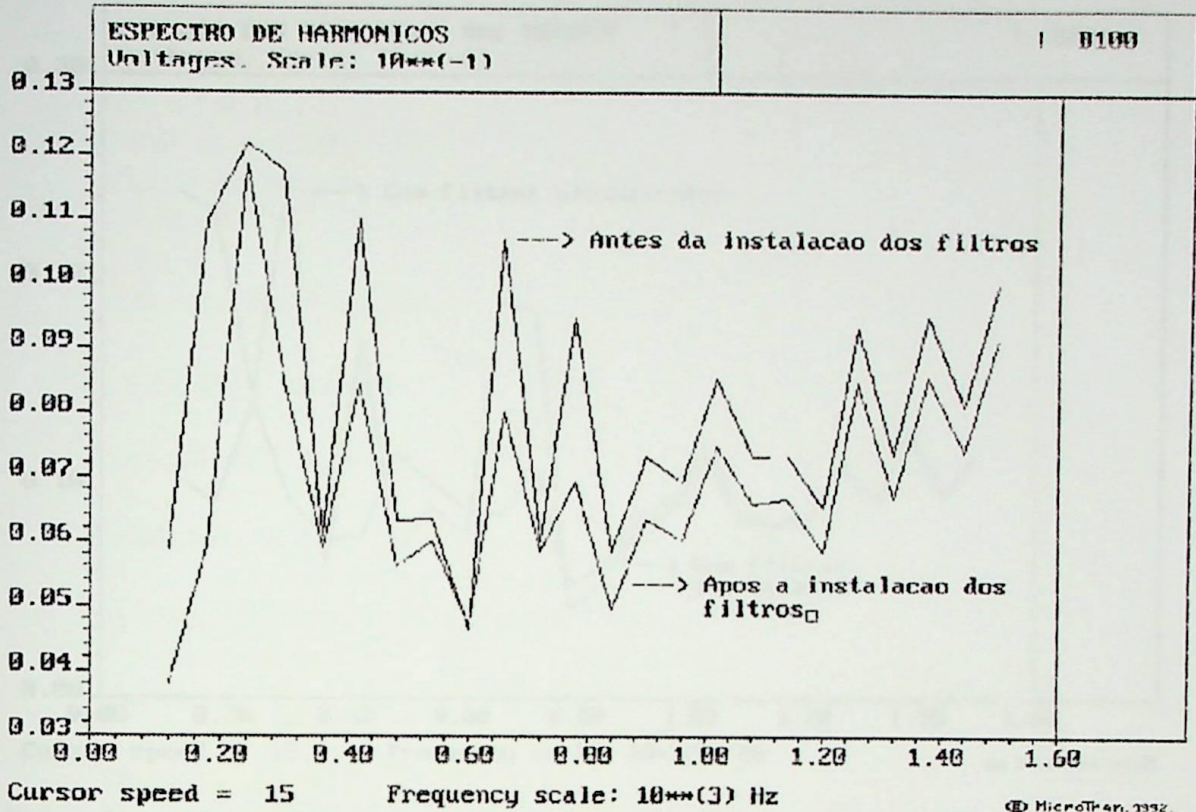


Figura 20 - Espectro de harmônicos de tensão para a barra B100.

$$Q_{BCN} = 300 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 658,18 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 1,444 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 1837,0 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 0,165 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 0,438 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 4,886 \text{ [\Omega]}$$

$$\text{Fator de qualidade} = 10$$

Tipo = Amortecido

Barra = B200

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 5^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Uma unidade de 380 [Volts] e 20 [kVAr].

Assim:

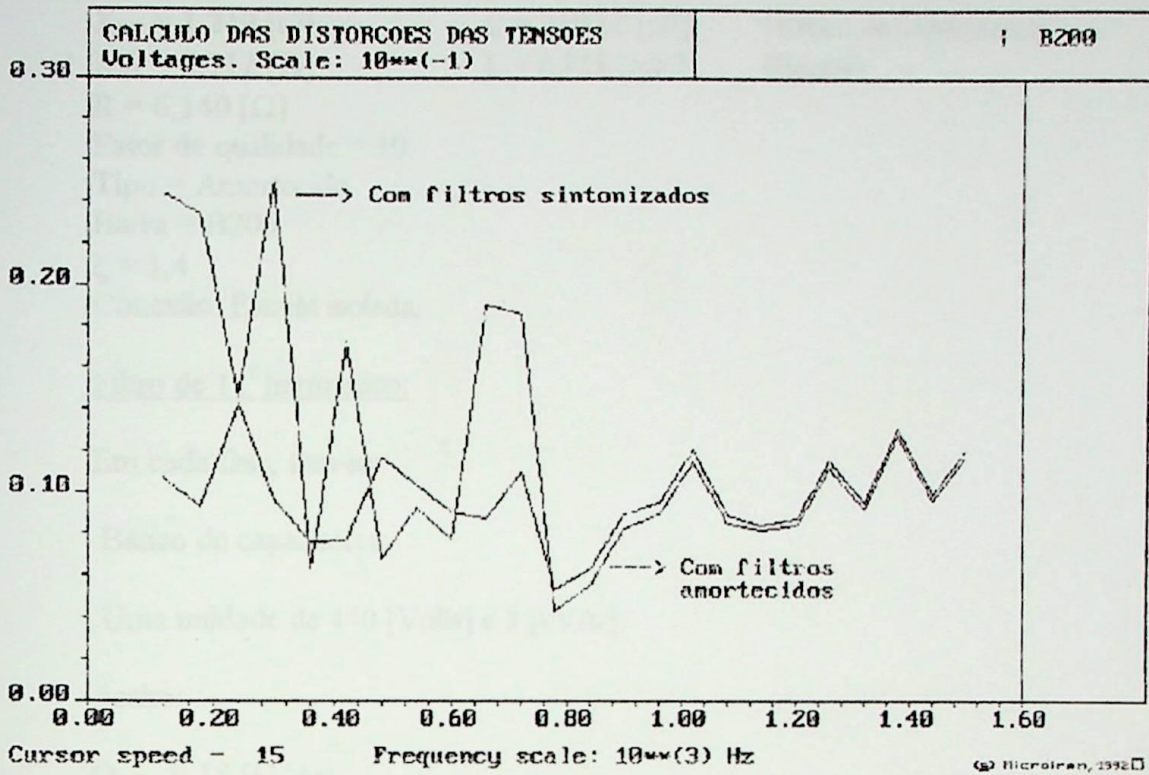


Figura 21 - Comparação entre os espectros de harmônicos de tensão para a barra B200 com os dois tipos de filtros instalados.

$$Q_{DCN} = 60 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 658,18 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 7,221 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 367,34 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 0,298 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 0,790 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 14,658 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 10

Tipo = Amortecido

Barra = B200

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 2^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Quatro unidades de 440 [Volts] e 160 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 480 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 762,10 \text{ [Volts]}$$



$X_{CI} = 1,210 [\Omega]$ $C = 2192,2 [\mu F]$ (Banco de capacitores)
 $X_{RI} = 0,312 [\Omega]$ $L = 0,828 [mH]$ (Reator)
 $R = 6,140 [\Omega]$
Fator de qualidade = 10
Tipo = Amortecido
Barra = B200
 $\xi = 1,4$
Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 11^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Uma unidade de 440 [Volts] e 5 [kVAr].

Assim:

$Q_{BCN} = 15 [kVAr]$
 $U_{BCN} = 762,10 [Volts]$
 $X_{CI} = 38,72 [\Omega]$ $C = 68,51 [\mu F]$ (Banco de capacitores)
 $X_{RI} = 0,330 [\Omega]$ $L = 0,875 [mH]$ (Reator)
 $R = 35,72 [\Omega]$
Fator de qualidade = 10
Tipo = Amortecido
Barra = B200
 $\xi = 1,2$
Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 7^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Uma unidade de 380 [Volts] e 10 [kVAr].

Assim:

$Q_{BCN} = 30 [kVAr]$
 $U_{BCN} = 658,18 [Volts]$
 $X_{CI} = 14,44 [\Omega]$ $C = 183,70 [\mu F]$ (Banco de capacitores)
 $X_{RI} = 0,306 [\Omega]$ $L = 0,812 [mH]$ (Reator)
 $R = 20,94 [\Omega]$
Fator de qualidade = 10



Tipo – Amortecido

Barra = B200

$\xi = 1,2$

Conexão: Estrela isolada.

Filtro de 13^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

.Uma unidade de 440 [Volts] e 5 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 15 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 762,1 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 38,72 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 68,510 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 0,236 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 0,626 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

$$R = 30,23 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 10

Tipo = Amortecido

Barra = B200

$\xi = 1,2$

Conexão: Estrela isolada.

Não há problemas de ressonância na retirada de qualquer um dos filtros.



EXEMPLO 6:

Seja o mesmo sistema do capítulo 7 de [1], mostrado na figura 22.

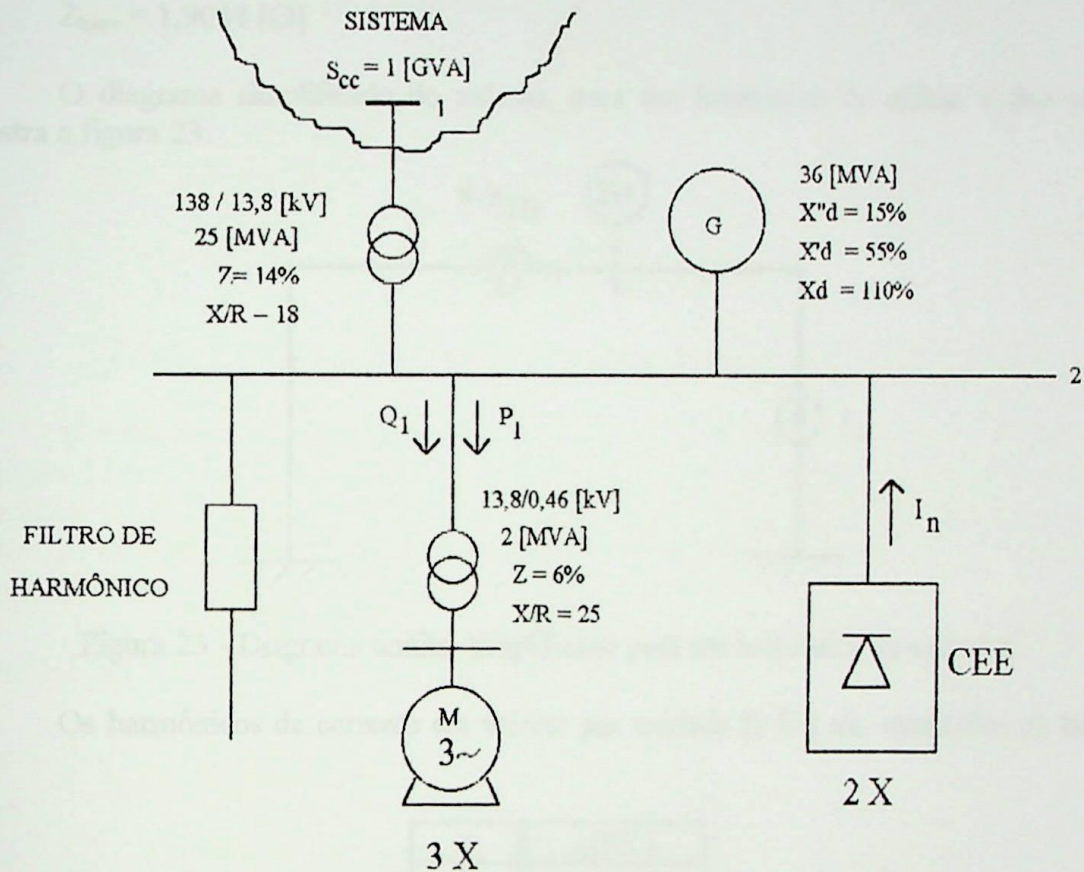


Figura 22 - Sistema em análise

Os harmônicos de corrente impostos pelas duas cargas elétricas especiais estão mostrado na tabela 20:

n	I _n [A]
3	11,2
4	5,00
5	23,2
7	11,2
9	10,44
11	127,8
12	4,64
13	81,2
17	11,2
19	23,2

Tabela 20 - Harmônicos de corrente medidos.



Os valores de base adotados são:

$$S_{base} = 100 \text{ [MVA]}$$

$$U_{base} = 13,8 \text{ [kV]}$$

$$I_{base} = 4183,698 \text{ [A]}$$

$$Z_{base} = 1,9044 \text{ [\Omega]}$$

O diagrama simplificado do sistema, para um harmônico de ordem n fica como mostra a figura 23.

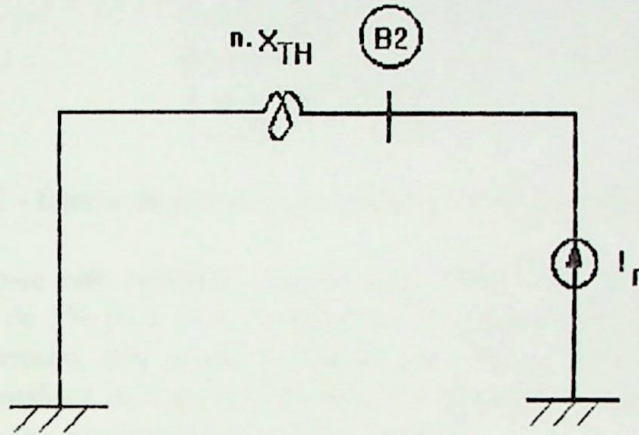


Figura 23 - Diagrama unifilar simplificado para um harmônico de ordem n .

Os harmônicos de corrente em valores por unidade [P.U.] são mostrados na tabela 21.

n	I_n [P.U.]
3	2,6771E-3
4	1,1951E-3
5	5,5453E-3
7	2,6771E-3
9	2,4954E-3
11	3,0547E-2
12	1,1061E-3
13	1,9409E-3
17	2,6771E-3
19	5,5453E-3

Tabela 21 - Harmônicos de corrente medidos, em valores por unidade.

Simulando-se o circuito mostrado (anexo 18, arquivo caso6.dat), podem-se calcular os fatores de distorção de tensão da barra B2, obtendo-se os valores mostrados na tabela 22.



n	F.D.(%)
3	0,21
4	0,12
5	0,71
7	0,48
9	0,57
11	8,58
12	0,34
13	6,44
17	1,16
19	2,69
Total	11,18

Tabela 22 - fatores de distorção de tensão antes da instalação dos filtros.

Comparando-se este resultado com a norma IEEE STD 519-1992 , mostrada no capítulo I (máximo de 3% para fator de distorção individual de tensão e 5% para fator de distorção total de tensão, nos níveis de tensão do sistema), observa-se que o fator de distorção total de tensão e os fatores individuais de distorção de tensão para o 11^o e 13^o harmônicos ultrapassam o permitido pela norma adotada.

Após a instalação dos filtros necessários, os fatores de distorção de tensão para a barra B2 ficam com os valores mostrados na tabela 23.

n	F.D.(%)
3	0,21
4	0,13
5	0,80
7	0,71
9	0,67
11	0,90
12	0,11
13	2,76
17	0,68
19	1,66
Total	3,66

Tabela 23 - Fatores de distorção de tensão após a instalação dos filtros.

O espectro de harmônicos de tensão para a barra B2 , antes e após a colocação dos filtros é mostrada na Figura 24.

A especificação final dos filtros então fica:

Filtro de 11^o harmônico:

Em cada fase, tem-se:



Banco de capacitores:

- . Três unidades em paralelo de 7620 [Volts] e 200 [kVAr] em série com
- . Sete unidades em série de 440 [Volts] e 30 [kVAr] em série com
- . Uma unidade de 220 [Volts] e 5 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 2445 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 18913,99 \text{ [Volts]}$$

$$X_{CI} = 146,31 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 18,13 \text{ [\mu F]}$$

(Banco de capacitores)

$$X_{RI} = 1,25 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 3,32 \text{ [mH]}$$

(Rcator)

$$R = 0,457 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo = Sintonizado

Barra = B2

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

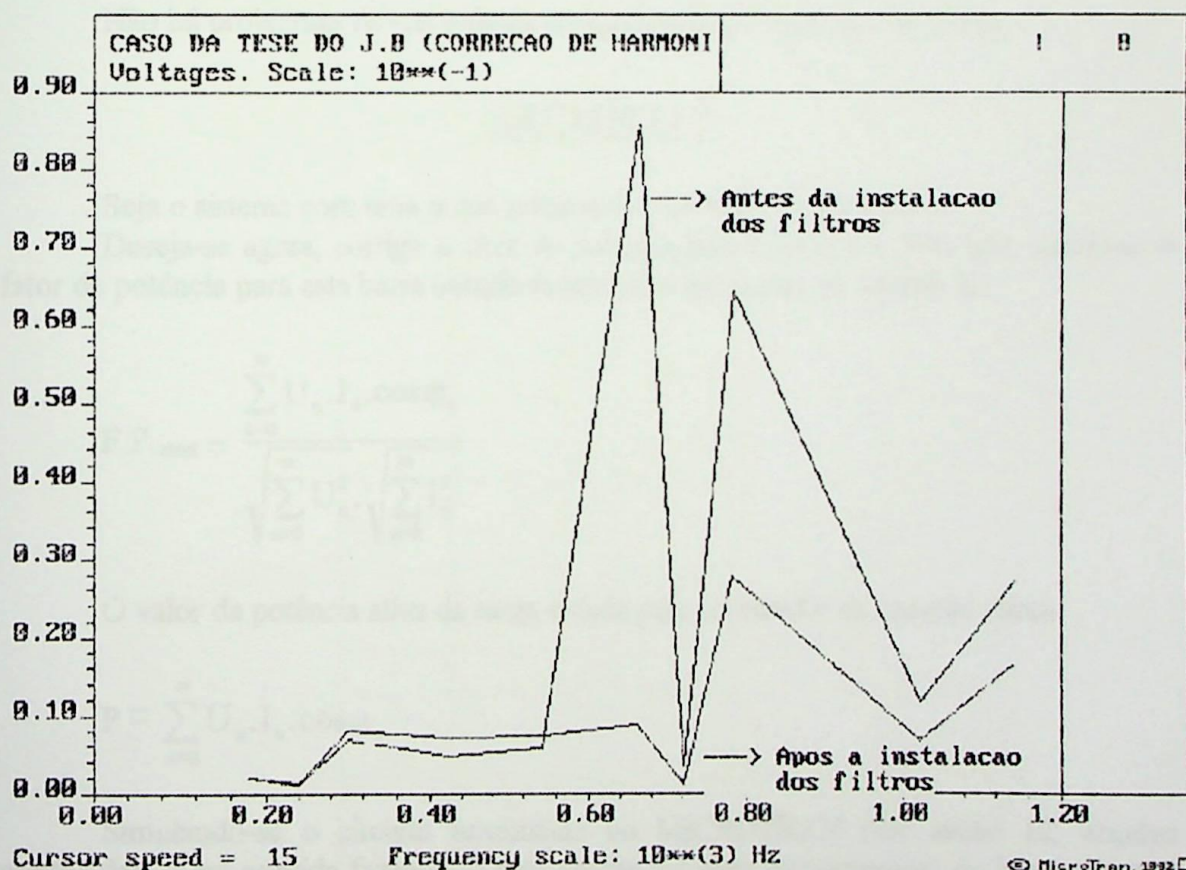


Figura 24 - Espectro dos harmônicos de tensão da barra B2 antes e após a instalação dos filtros.

Filtro de 9º harmônico::

Em cada fase, tem-se:



Banco de capacitores:

- . Uma unidade de 7620 [Volts] e 50 [kVAr] em série com
- . Seis unidades em série de 380 [Volts] e 5 [kVAr].

Assim:

$$Q_{BCN} = 240 \text{ [kVAr]}$$

$$U_{BCN} = 17147,3 \text{ [Volts]}$$

$$X_{C1} = 1226,0 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 2,16 \text{ [\mu F]} \text{ (Banco de capacitores)}$$

$$X_{R1} = 15,59 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 41,35 \text{ [mH]} \text{ (Reator)}$$

$$R = 5,72 \text{ [\Omega]}$$

Fator de qualidade = 30

Tipo - Sintonizado

Barra = B2

$$\xi = 1,2$$

Conexão: Estrela isolada.

Não há problemas de ressonância na retirada de qualquer um dos filtros.

EXEMPLO 7:

Seja o sistema com uma ponte retificadora mostrado no exemplo 2.

Deseja-se agora, corrigir o fator de potência para a barra B8. Para isto, calcula-se o fator de potência para esta barra usando as equações mostradas no capítulo II.

$$F.P._{\text{atual}} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}}$$

O valor da potência ativa da carga é dada pelo numerador da equação acima.

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$$

Simulando-se o circuito novamente no MICROTRAN (ver anexo 12, arquivo ponte1.dat) e em seguida fazendo-se uma análise em série trigonométrica de Fourier para a tensão na barra B8A e outra para a corrente da barra B8A para a barra 2A, obtêm-se os valores mostrados nas tabelas 24 e 25.



n	Magnitude [Volts]	Ângulo [graus]
0	2,24	0,00
1	392,55	-91,35
2	4,79	-20,31
3	4,55	-23,53
4	4,44	-33,06
5	11,42	-173,43
6	4,29	-41,37
7	10,96	-90,00
8	4,44	-59,38
9	3,97	-60,67
10	3,61	-76,25
11	9,41	143,79
12	3,49	-80,34
13	8,79	47,37
14	3,57	-103,13
15	2,96	-100,26
16	2,49	-121,37
17	6,53	100,68
18	2,35	-120,45
19	5,77	4,13

Tabela 24 - Tensão para a barra B8A.

n	Magnitude [Amp.]	Ângulo [graus]
0	206,19	0,000000
1	12555,56	-124,47
2	453,21	-4,30
3	405,73	-10,29
4	442,40	-17,52
5	2605,87	-81,88
6	395,47	-20,70
7	1427,00	-152,11
8	425,05	-26,04
9	373,56	-30,57
10	394,54	-38,77
11	1024,54	-106,65
12	347,73	-40,65
13	462,06	177,85
14	362,39	-46,92
15	314,59	-49,69
16	318,16	-58,36
17	455,59	-127,70
18	277,76	-58,70
19	91,291	131,83

Tabela 25 - Corrente da barra B8A para a barra 2A.



Assim obtêm-se:

$$\begin{aligned} F.P._{atual} &= 0,8051366 \\ P &= 2063232,43 \text{ [Watts]} \quad (\text{por fase}) \end{aligned}$$

Adotando-se como valores de base:

$$\begin{aligned} S_{base} &= 100 \text{ [MVA]} \\ U_{base} &= 4160 \text{ [Volts]} \quad (\text{nível de tensão da barra B8}) \\ I_{base} &= 13878,6 \text{ [A]} \\ Z_{base} &= 0,173056 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

Vêm:

$$\begin{aligned} F.P._A &= 0,8051366 \quad (\text{Fator de potência atual}) \\ P &= 6,189697E-2 \text{ [P.U.]} \end{aligned}$$

Corrigindo o fator de potência para 0,94, os fatores de distorção de tensão para a barra B8A ficam com os valores mostrados na tabela 26.

n	F.D.(%)
2	0,28
3	0,44
4	0,21
5	2,45
6	0,52
7	2,27
8	0,79
9	0,79
10	0,94
11	2,70
12	1,00
13	1,45
14	1,23
15	1,14
16	1,23
17	1,88
18	1,22
19	0,42
Total	5,81

Tabela 26 - Fatores de distorção de tensão após a instalação do filtro para correção do fator de potência.

Nota-se que os fatores de distorção de tensão abaixaram, muito embora não tenha sido este o objetivo da instalação do filtro.



A especificação do filtro para correção do fator de potência, fica:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores :

- . Três unidades em paralelo de 2400 [Volts] e 300 [kVAr] em série com
- . Uma unidade de 380 [Volts] e 100 [kVAr], em série com
- . Uma unidade de 220 [Volts] e 70 [kVAr].

Assim:

$$U_{BCN}(\text{fase}) = 2400 + 380 + 220 = 3000 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN}(\text{fase}) = 3 \cdot 300 + 100 + 70 = 1070 \text{ [kVAr]}$$

Têm-se então:

$$U_{BCN} = 5196,2 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN} = 3210 \text{ [kVAr]}$$

$$X_{C1} = 8,450 \text{ [\Omega]}$$

$$C = 313,9 \text{ [\mu F]} \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 0,503 \text{ [\Omega]}$$

$$L = 80,06 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

Barra = B8A

Conexão: Estrela isolada.

EXEMPLO 8:

Seja o mesmo caso mostrado no exemplo 6. A intenção aqui é a instalação de filtros para a correção do fator de potência.

Sendo assim, repetindo o diagrama simplificado do sistema para um harmônico de ordem n e os valores em [P.U.] dos harmônicos de corrente medidos, vem:

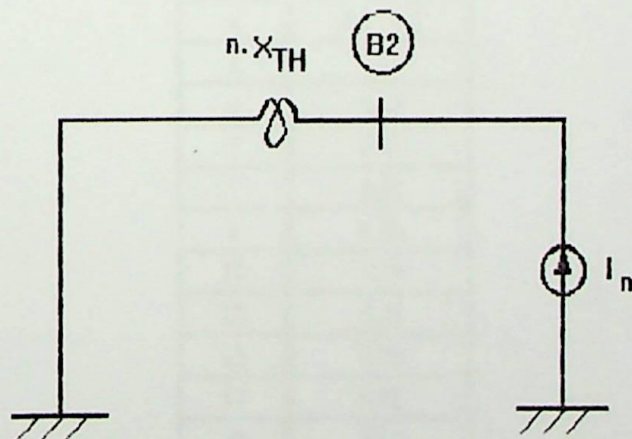


Figura 25 - Diagrama simplificado do sistema a ser analisado para harmônico de ordem n .



n	I_n [P.U.]
3	2,6771E-3
4	1,1951E-3
5	5,5453E-3
7	2,6771E-3
9	2,4954E-3
11	3,0547E-2
12	1,1061E-3
13	1,9409E-3
17	2,6771E-3
19	5,5453E-3

Tabela 27 - Harmônicos de corrente medidos.

Sendo:

$$S_{base} = 100 \text{ [MVA]}$$

$$U_{base} = 13800 \text{ [Volts]}$$

$$I_{base} = 4183,7 \text{ [A]}$$

$$Z_{base} = 1,9044 \text{ [\Omega]}$$

O valor do fator de potência medido foi de:

$$F.P.A = 0,87$$

A potência ativa medida foi de:

$$P = 2,94 \text{ [MW]} = 2,94E-1 \text{ [P.U.]}$$

Corrigindo o fator de potência para 0,94, os fatores de distorção de tensão para a barra B2 ficam com os valores mostrados na tabela 28.

n	F.D.(%)
3	0,28
4	0,03
5	0,41
7	0,35
9	0,44
11	6,70
12	0,27
13	5,08
17	0,92
19	2,15
Total	8,76

Tabela 28 - Fatores de distorção de tensão após a instalação do filtro para correção do fator de potência.



Nota-se que os fatores de distorção de tensão abaixaram, muito embora não tenha sido este o objetivo da instalação do filtro.

Podem-se agora instalar filtros para abaixar os fatores de distorção de tensão da barra B2. Isto será feito no capítulo V, usando o programa MTFILTRO.

A especificação do filtro para correção do fator de potência fica então:

Em cada fase, tem-se:

Banco de capacitores:

- . Quatro unidades em paralelo de 6600 [Volts] e 300 [kVAr] em série com
- . Uma unidade de 2400 [Volts] e 300 [kVAr].

Assim:

$$U_{BCN}(\text{fase}) = 2400 + 6600 = 9000 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN}(\text{fase}) = 4 \cdot (300 + 300) = 2400 \text{ [kVAr]}$$

Tem-se então:

$$U_{BCN} = 15588,5 \text{ [Volts]}$$

$$Q_{BCN} = 7200 \text{ [kVAr]}$$

$$X_{C1} = 33,7 \text{ } [\Omega]$$

$$C = 78,6 \text{ } [\mu\text{F}] \quad (\text{Banco de capacitores})$$

$$X_{R1} = 2,01 \text{ } [\Omega]$$

$$L = 5,331 \text{ [mH]} \quad (\text{Reator})$$

Barra = B2

Conexão: Estrela isolada.

CAPÍTULO IV

O PROGRAMA MTFILTRO



1 - OBJETIVOS E RESULTADOS OBTIDOS

O programa MTFILTRO, desenvolvido em linguagem de programação TURBO PASCAL, tem como objetivo realizar os mesmos procedimentos descritos no capítulo anterior para correção de fator de potência e/ou diminuição dos fatores de distorção de tensão de um sistema elétrico.

Nota-se no capítulo anterior, a cada exemplo, a grande dificuldade que é escolher o filtro adequado, ou filtros adequados, isto devido aos inúmeros cálculos, montagens de tabelas, cálculos de fatores de distorção de tensão, montagens de arquivos do MICROTRAN, leitura de arquivos de saída do MICROTRAN, somatórios intermináveis (apenas os resultados destes foram mostrados), análise de contingências, etc. Isto sem falar da falta de flexibilidade como, por exemplo, alterar o valor do fator de qualidade de cada filtro, trocar um determinado filtro de barra no sistema, instalar um outro filtro ao invés de aumentar a potência nominal ou tensão nominal de um determinado filtro ou vice-versa, e inúmeros outros, que ficariam impraticáveis, quando feitos manualmente, conforme mostrado no capítulo III.

Assim, o programa MTFILTRO elimina as dificuldades listadas no item anterior, bem como oferece uma grande flexibilidade para a escolha dos filtros, podendo-se assim alterar qualquer parâmetro de qualquer filtro, instalar ou retirar filtros, etc.

O programa mostra como resultados os fatores de distorção de tensão antes e após a colocação dos filtros, bem como os parâmetros de especificação, como tipo, barra a instalar, objetivo da instalação, potência nominal e tensão nominal, sintonia, fator de qualidade, tipo de conexão.

2- PRÉ-REQUISITOS DE FUNCIONAMENTO

Para o programa MTFILTRO ser executado corretamente, é necessário que os programas MICROTRAN, HARMONIC e o editor de texto do MS-DOS, EDIT.COM estejam no mesmo diretório de MTFILTRO, ou esteja incluído no "caminho" alternativo ("path").

Além disto, é necessária uma memória do tipo convencional de, no mínimo, 619800 [Bytes]. Caso não seja possível obter esta memória, podem-se, como alternativa, executar consecutivamente os programas MTF1.EXE, MTF2.EXE e CONTING.EXE. A esta alternativa, denomina-se "modo alternativo de MTFILTRO".

Estes programas nada mais são que o programa MTFILTRO separado em três partes independentes, de modo que a exigência mínima de memória convencional passa a ser de 588400 [Bytes].

Ao se optar pelo modo alternativo de MTFILTRO, deve-se digitar no "Prompt" do DOS, MTF1, ao invés de MTFILTRO. Assim, será executado a primeira parte de MTFILTRO. O próprio programa indicará o momento de se executar a segunda e terceira partes de MTFILTRO, solicitando ao usuário digitar no Prompt do DOS, respectivamente MTF2 e CONTING.



3 - COMO USAR O PROGRAMA MTFILTRO

O programa MTFILTRO é interativo com usuário e, de certa forma auto-explicativo, pois à medida que vai sendo executado, o programa vai pedindo os dados necessários e mostrando opções através de "Menus". Podem-se também acessar arquivos de ajuda a partir de qualquer ponto do programa, apertando-se a tecla 0 (zero). O fluxograma do programa foi colocado no caderno extra devido a sua grande extensão.

Deve ser digitado no PROMPT do DOS, MTFILTRO (ou MTF1, se estiver sendo utilizado o modo alternativo). Aparecerá na tela, a apresentação da primeira parte do programa. Em seguida, o programa MTFILTRO pede que se entre com o valor em [Hz] da frequência fundamental utilizada.

Os dados de entrada do programa MTFILTRO podem ser oriundos de simulação ou medição. Por isto MTFILTRO pergunta: Simulação ou Medição?

Para simulação, MTFILTRO calcula através de uma análise de Fourier utilizando o programa HARMONIC, os harmônicos de corrente de uma dada Carga Elétrica Especial (C.E.E.) geradora de harmônicos. A partir disto, o programa MTFILTRO monta o arquivo do MICROTRAN com o sistema monofásico, onde a C.E.E. é substituída por fontes de corrente, com os valores dos harmônicos de corrente calculados anteriormente. Este arquivo do MICROTRAN é denominado arquivo base.

Para medição, o usuário deve entrar já com o arquivo base, contendo os valores dos harmônicos medidos, na forma de fontes ideais de corrente.

3.1 - CASO DE SIMULAÇÃO OU CASO DE MEDIÇÃO

3.1.1 - CASO DE SIMULAÇÃO

Ao se digitar a tecla S, o programa MTFILTRO pedirá o nome do arquivo MICROTRAN do sistema trifásico a ser analisado. Sobre este sistema é que será feita a análise de Fourier para a montagem do arquivo base. Pode-se usar, neste arquivo, quaisquer valores para XOPT e COPT no primeiro cartão. No segundo cartão (cartão de tempo), nada deve constar nos campos de ISTEADY, FMIN, DELTAF e FMAX, pois ao executar este arquivo no MICROTRAN, este deverá fornecer as "curvas" para a análise de Fourier. O número de barras utilizadas neste arquivo é limitado pela versão do programa MICROTRAN utilizada (ver como exemplo o arquivo ponte1.dat, anexo 12., utilizado no capítulo anterior).

A seguir, MTFILTRO pedirá o arquivo do MICROTRAN de um sistema monofásico, com os parâmetros do sistema em valores por unidade [P.U.] e sem as Cargas Elétricas Especiais.

Este arquivo pedido deverá ser de um sistema monofásico equivalente ao sistema trifásico pedido anteriormente, com valores em [P.U.], segundo valores de base que serão pedidos posteriormente. Novamente, não há restrições para XOPT e COPT no primeiro cartão do arquivo, pois o programa trabalhará bem com quaisquer destes valores colocados. No cartão de tempo deverá ser colocado o valor "1" no campo de ISTEADY. Os campos FMIN, DELTAF e FMAX deverão ser preenchidos de acordo com as frequências utilizadas. Por exemplo, para frequência fundamental de 60 [Hz], FMIN deverá ser preenchido com 60, DELTAF com -60 e FMAX, dependendo do número de harmônicos a serem analisados (por exemplo, 1200, para uma frequência de, no máximo, vinte vezes a frequência fundamental). Este arquivo não deverá conter nenhuma fonte, porém, por problemas do MICROTRAN



(que não aceita um sistema sem fonte), deve ser colocado uma fonte de tensão com um valor muito pequeno (por exemplo $10E-10$ [P.U.]) e uma frequência não múltipla da fundamental. O número de barras deste arquivo está limitado a doze (ver como exemplo o arquivo caso2.dat anexo 14, utilizado no capítulo anterior). O arquivo do sistema monofásico deverá conter as barras com os mesmos nomes das barras de uma das fases do sistema trifásico.

Em seguida, MTFILTRO pede o nome do arquivo de saída.

MTFILTRO simula no MICROTRAN o sistema trifásico.

Se estiver sendo utilizado o programa MTFILTRO pela primeira vez, aparecerá uma mensagem dizendo que o arquivo de parâmetros usado pelo programa HARMONIC não existe. Neste caso, MTFILTRO pedirá os valores da frequência fundamental, o instante do início da análise e o número de harmônicos para a análise de Fourier. MTFILTRO monta o arquivo de parâmetros. Toda vez que se executar MTFILTRO daqui por diante, será utilizado este arquivo de parâmetros, porém ao invés da mensagem anterior, MTFILTRO exibirá uma tela mostrando os valores dos parâmetros e perguntando um a um se é desejado alterar algum deles.

A seguir, aparece uma mensagem perguntando se o arquivo do sistema trifásico inicial está referido a algum nível de tensão. Se neste arquivo foi utilizada a modelagem de transformador do MICROTRAN (ver exemplo 3 do capítulo anterior), as tensões das barras não estarão referidas a um mesmo nível de tensão, então, digita-se N (Não). Se no arquivo do sistema trifásico, as tensões das barras estiverem referidas a um mesmo nível de tensão (ver exemplo 2, capítulo anterior), então digita-se S (Sim). O programa perguntará o nível de tensão, ao qual o sistema está referido.

Aparecerá, em seguida, uma mensagem pedindo para se escolher a corrente a ser analisada pelo programa HARMONIC. Escolhe-se o número correspondente à corrente que se deseja analisar. O programa MTFILTRO executa o programa HARMONIC e em seguida pergunta ao usuário se existe mais alguma fonte de harmônicos do sistema trifásico inicial que deseje ser analisado. Digita-se S (Sim) ou N (Não). MTFILTRO trabalha com até três fontes de harmônicos.

A seguir, MTFILTRO preenche adequadamente os campos de ISTEADY, FMIN, DELTAF, e FMAX do cartão de tempo do arquivo do sistema trifásico inicial para posteriormente calcular os valores de tensão na frequência fundamental para cada barra. Estes valores serão utilizados posteriormente para o cálculo dos fatores de distorção de tensão.

MTFILTRO pergunta, a seguir, quais os valores dos níveis de tensão em cada barra. Estes valores serão utilizados como tensões de base para cada barra. Logo após, MTFILTRO pergunta o valor da potência de base. Digita-se um valor em [MVA].

O programa converterá os valores dos harmônicos de corrente para valores por unidade [P.U.] e os colocará no arquivo monofásico inicialmente pedido como fontes ideais de corrente. Para isto, MTFILTRO pede a confirmação da barra a serem colocadas as fontes de corrente. Se não confirmar, MTFILTRO pede a barra onde as fontes de corrente serão colocadas. MTFILTRO monta então o arquivo base.

MTFILTRO executa o arquivo base no MICROTRAN, e a partir do arquivo de saída calcula os fatores de distorção de tensão para as barras e mostra ao usuário, se este assim o desejar.



3.1.2 - CASO DE MEDIÇÃO

Ao se digitar a tecla M, o programa MTFILTRO pedirá o nome do arquivo base.

Este arquivo deve ter os valores dos parâmetros em [P.U.] segundo uma base adotada (níveis de tensões das barras), valores desta serão pedidos posteriormente. Neste arquivo não há restrição quanto aos valores de XOPT e COPT utilizados, porém o cartão de tempo deve ter o campo ISTEADY preenchido com "1". Os campos FMIN, DELTAF e FMAX devem ser preenchidos de acordo com as frequências utilizadas. Por exemplo, para frequência fundamental de 60 [Hz], FMIN deve ser preenchido com 60, DELTAF com -60 e FMAX dependendo do número de harmônicos a serem analisados, por exemplo, 1500, para uma frequência de, no máximo, vinte e cinco vezes a frequência fundamental.

As fontes de corrente no arquivo base devem ser colocadas de forma crescente de frequências (mesmo que em algumas frequências não sejam colocadas fontes de corrente) e, logicamente, em valores [P.U.] de pico. Não deve ser colocada fonte de corrente na frequência fundamental. Como exemplo, ver o arquivo caso1.dat, anexo1, utilizado no exemplo 1 do capítulo anterior.

MTFILTRO executa o arquivo base no MICROTRAN, e a partir do arquivo de saída calcula os fatores de distorção de tensão para as barras e mostra o resultado ao usuário, se este assim o quiser.

Caso não se tenham os dados das tensões nas barras à frequência fundamental, o programa MTFILTRO pergunta ao usuário, se pode estimar em 1 [P.U.]. Se não, MTFILTRO pergunta os valores de tensão à frequência fundamental para cada barra.

O programa MTFILTRO pede os níveis de tensão em todas as barras e o valor da potência de base utilizada, em [MVA]. Os valores das tensões de base utilizadas por MTFILTRO serão os mesmos dados pelos níveis de tensão em cada barra.

3.2 - COMPARAÇÃO COM NORMA

Antes de fazer a comparação dos fatores de distorção de tensão com uma dada norma, MTFILTRO pergunta ao usuário, se é desejado trabalhar com valores em [P.U.] ou valores no Sistema Internacional de Unidades [S.I.]. Ao se optar pela primeira alternativa, todas as perguntas feitas pelo programa daqui para frente e o resultado final serão expressos em valores [P.U.]. Se optar pela segunda alternativa, serão expressos em unidades do [S.I.], ou seja, tensão em [Volts], potência em [VAr] e assim por diante.

O programa MTFILTRO lista, a seguir, as normas que podem ser utilizadas. Deve-se escolher uma delas, digitando o número que aparece à esquerda da norma correspondente.

A seguir, o programa pergunta se existe alguma barra do sistema, onde não seja necessário verificar os fatores de distorção de tensão. Se sim, o programa irá perguntando pelas barras. Os fatores de distorção de tensão destas barras não serão levados em consideração, quando forem instalados os filtros, não significando que os filtros não possam ser instalados nestas barras.

MTFILTRO lista os fatores de distorção de tensão que ultrapassam a norma adotada. Se existirem muitas e preencher toda a tela, o programa pergunta ao usuário, se é desejado ver novamente. Se sim, MTFILTRO mostra novamente, usando o editor de texto EDIT do MS-DOS.



3.3 - INSTALAÇÃO DE FILTROS COM OBJETIVO DE CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

O programa pergunta ao usuário, se é desejado instalar filtro para correção do fator de potência. Se sim, MTFILTRO pergunta a barra onde se deseja instalar o filtro.

Se o arquivo base é oriundo de medição, o programa pede o valor do fator de potência atual e o valor da potência ativa consumida pela carga.

Se o arquivo base é proveniente de simulação, o programa pede através do programa HARMONIC a tensão de barra e corrente para que se possa calcular o fator de potência e a potência ativa consumida pela carga através das seguintes equações, mostradas no capítulo I.

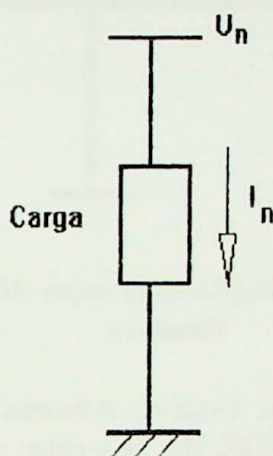


Figura 1 - Uma carga instalada na barra.

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$$

$$F.P. = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}}$$

A seguir, MTFILTRO pergunta se há mais alguma corrente necessária ao cálculo do fator de potência. Isto se aplica caso o esquema mostrado na figura 1 tenha mais ramos, conforme mostra a figura 2.

Neste caso, MTFILTRO somará fasorialmente as correntes de todos os ramos para todos os harmônicos e assim calculará o fator de potência atual.

Após calcular os valores da potência ativa e do fator de potência, o programa mostra o resultado na tela.

A seguir, MTFILTRO pergunta se é desejado corrigir o fator de potência para 0,94. Se não, o programa pedirá o fator de potência desejado. O programa MTFILTRO pede, a seguir, a sintonia, sugerindo 4,1. Se não for aceita esta sugestão, o programa pede o valor desta, aconselhando a se evitar um número inteiro.

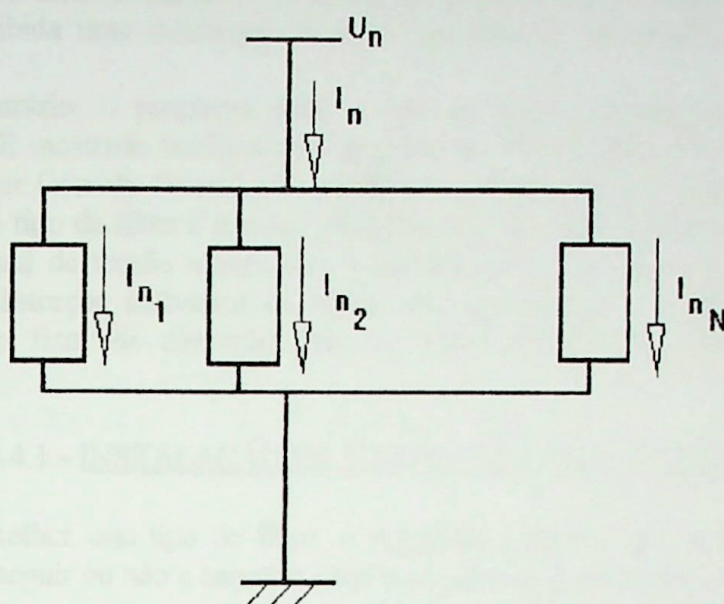


Figura 2 - Várias cargas instaladas numa mesma barra(para cálculo do fator de potência do conjunto).

MTFILTRO calcula os parâmetros do banco de capacitores (B.C.) inicial (conforme mostrado no capítulo II), monta o arquivo do MICROTRAN e efetua a simulação.

Através do arquivo de saída do MICROTRAN, MTFILTRO calcula os parâmetros do filtro básico, monta o arquivo e faz a simulação no MICROTRAN.

Com os valores dos harmônicos de corrente que circulam pelo filtro básico, MTFILTRO calcula os valores de U_{BC} e Q_{BC} através das equações 35 e 36 do capítulo II.

O programa pede então ao usuário um valor para U_{BCN} superior a U_{BC} e Q_{BCN} superior a Q_{BC} , tendo-se assim o filtro nominal. MTFILTRO monta então o arquivo do MICROTRAN com este filtro e faz a simulação. Em seguida, com os valores dos harmônicos de corrente pelo filtro nominal obtidos do arquivo de saída do MICROTRAN, calcula através das equações 41 e 42 do capítulo II, os valores de U_{teste} e Q_{teste} e os exibe na tela. Se não verificar ($U_{teste} > U_{BCN}$ e/ou $Q_{teste} > Q_{BCN}$), MTFILTRO repete a seqüência descrita neste parágrafo até verificar.

Verificando, o programa pergunta a seguir, se é desejado corrigir o fator de potência para mais alguma barra do sistema. Se sim, todo o procedimento é repetido. Se não, MTFILTRO calcula os fatores de distorção de tensão para cada barra após a instalação do(s) filtro(s) para correção do fator de potência, mostra ao usuário, se este assim o desejar, e em seguida faz a comparação com a norma adotada.

3.4 - INSTALAÇÃO DE FILTRO COM OBJETIVO DE DIMINUIÇÃO DOS FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO

O programa MTFILTRO inicia o procedimento para o cálculo dos parâmetros dos filtros para diminuição dos fatores de distorção de tensão mostrando uma tela que indica que se iniciará a segunda parte do mesmo.



Se nenhum fator de distorção de tensão ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada, será exibida uma mensagem dizendo que não há necessidade da instalação de filtros.

Caso contrário, o programa pede o tipo de filtro a instalar, sintonizado (S) ou amortecido (A). É mostrado também uma sugestão de MTFILTRO. Nesta sugestão, está a barra com o maior fator de distorção de tensão e a ordem onde isto acontece. O programa sugere também o tipo de filtro a instalar. Será sugerido tipo sintonizado se o maior fator de distorção individual de tensão ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada. Se o maior fator de distorção individual de tensão não ultrapassou o máximo permitido pela norma, apenas o fator de distorção total de tensão ultrapassou, será sugerido o tipo amortecido.

3.4.1 - INSTALAÇÃO DE FILTRO TIPO SINTONIZADO

Ao se escolher este tipo de filtro, o programa pergunta qual a barra onde vai se instalar (pode-se seguir ou não a sugestão dada pelo programa) e a sintonia (ordem) do filtro.

Em seguida, o programa exibe uma mensagem dizendo que $\xi = 1,2$. Este é um valor necessário para se calcular os parâmetros do filtro básico e deve ficar entre 1,1 e 1,4. O programa pergunta então se o usuário deseja alterar este valor. Se sim, MTFILTRO pedirá por um valor entre 1,1 e 1,4.

O programa faz o mesmo para o valor do fator de qualidade, cujo valor suposto inicialmente é 30.

Em seguida, calcula os parâmetros do filtro básico, monta o arquivo MICROTRAN com este filtro e faz a simulação. Com o arquivo de saída proveniente da simulação, MTFILTRO calcula os valores de U_{BC} e o valor de Q_{BC} através das equações 51 e 53 do capítulo II.

Com isto, o programa pede um valor de U_{BCN} maior que U_{BC} e um valor de Q_{BCN} maior que Q_{BC} . Tem-se assim o filtro nominal. MTFILTRO calcula em seguida os parâmetros do filtro, monta o arquivo MICROTRAN e faz a simulação.

Com o arquivo de saída do MICROTRAN, o programa calcula os fatores de distorção de tensão e mostra ao usuário, se este assim o desejar, utilizando o editor de texto do MS-DOS, EDIT.

Se os fatores de distorção de tensão ficaram abaixo do máximo permitido pela norma adotada, MTFILTRO exibe uma mensagem indicando que isto aconteceu e então, se passa à etapa de verificação.

3.4.2 - INSTALAÇÃO DE FILTRO TIPO AMORTECIDO

Ao se escolher este tipo de filtro, o programa pergunta qual a barra onde se vai instalar e a sintonia do mesmo.

MTFILTRO mostra em seguida uma mensagem dizendo que $\xi = 1,2$, perguntando ao usuário se é desejado alterar. Se sim, pedirá um valor entre 1,1 e 1,4. O programa faz o mesmo para o fator de qualidade, cujo valor suposto inicialmente é igual a 10.

Em seguida, o programa calcula os parâmetros do filtro básico, monta o arquivo MICROTRAN com este filtro e faz a simulação. Com o arquivo de saída proveniente da simulação, MTFILTRO calcula os valores de U_{BC} e Q_{BC} .



Com isto, é pedido um valor de U_{BCN} maior que U_{BC} e um valor de Q_{BCN} maior que Q_{BC} . Tem-se assim o filtro nominal. O programa calcula em seguida os parâmetros do filtro, monta o arquivo MICROTRAN e faz a simulação.

Com o arquivo de saída do MICROTRAN, o programa calcula os fatores de distorção de tensão e mostra ao usuário se este assim o desejar.

Se os fatores de distorção de tensão ficaram abaixo do máximo permitido pela norma adotada, MTFILTRO exibe uma mensagem indicando que isto aconteceu e então, se passa à etapa de verificação.

Se após a instalação do filtro, existirem fatores de distorção de tensão que não ficaram abaixo do máximo permitido pela norma adotada, MTFILTRO exibe uma tela, perguntando ao usuário se este deseja Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro ou voltar ao arquivo Base.

a - Opção Continuar:

Se for escolhida esta opção, o programa MTFILTRO segue seu curso normal. Existindo algum fator de distorção de tensão acima do máximo permitido pela norma adotada, MTFILTRO perguntará se é desejado instalar outro filtro ou alterar parâmetros de algum dos filtros já instalados.

A sugestão mostrada por MTFILTRO indicará alterar filtro se o maior fator de distorção individual de tensão encontrado for na barra e para um harmônico onde já exista um filtro instalado. Caso contrário, MTFILTRO irá sugerir instalar um filtro na barra e para o harmônico onde foi encontrado o maior fator de distorção individual de tensão.

Ao se optar por instalar filtro, MTFILTRO mostra ao usuário, se este assim o desejar, os parâmetros dos outros filtros já instalados.

Ao se optar por alterar algum filtro já instalado, MTFILTRO mostra ao usuário os parâmetros dos filtros já instalados e pergunta qual dos filtros se deseja alterar. O usuário deve escolher um dos filtros através do número correspondente mostrado por MTFILTRO. O programa, então, vai mostrando os parâmetros do filtro escolhido, um a um e perguntando ao usuário se é desejado alterar ou não. Ao fim da alteração, MTFILTRO monta o arquivo do MICROTRAN com o filtro alterado e faz a simulação. Em seguida, calcula os fatores de distorção de tensão e faz a comparação com a norma adotada.

b- Opção Voltar à situação anterior:

Esta opção se aplica, caso o usuário, após alguma manobra (instalação de filtro ou alteração) não gostar do resultado e quiser voltar novamente à situação anterior.

Ao se escolher esta opção, o programa MTFILTRO volta ao caso anterior à última manobra (instalação ou alteração), mostrando os parâmetros dos filtros desta etapa. Em seguida, pergunta se é desejado voltar à situação anterior novamente. Se sim, MTFILTRO volta à situação anterior à penúltima manobra processada e assim por diante, podendo-se mesmo chegar até o arquivo base novamente, onde MTFILTRO exibirá uma mensagem indicando este fato.

A seguir, MTFILTRO recupera os dados referentes aos fatores de distorção de tensão e os mostra ao usuário.



Logo após, o programa perguntará, assim como no item anterior, se é desejado instalar um outro filtro ou alterar algum filtro já instalado (a não ser que se tenha chegado ao arquivo base, onde não existe nenhum filtro instalado).

c - Opção Retirar algum filtro:

Esta opção se aplica caso o usuário suspeite que um determinado filtro instalado esteja piorando as condições do sistema ao invés de melhorar.

O programa MTFILTRO mostra, se o usuário desejar, os filtros já instalados (a menos que se tenha apenas um filtro instalado). Em seguida, pede o número correspondente do filtro a ser retirado.

O programa então retira o filtro escolhido, e caso ainda restem mais filtros, pergunta se deseja retirar mais algum. Se sim, MTFILTRO exibe uma mensagem indicando que os números dos filtros foram alterados (por exemplo, se retirou o filtro número 2, o de número 4 passa a ser o número 3, o número 3 passa a ser o número 2, e assim por diante), sugerindo que se vejam os filtros novamente antes de se escolher o que deverá ser retirado. Então, o programa retira o filtro escolhido usando o mesmo procedimento.

Se o usuário continuar a retirar os filtros, no último deles será mostrada uma mensagem indicando que se chegará novamente ao arquivo base.

Em seguida, MTFILTRO faz a simulação no MICROTRAN, calcula os fatores de distorção de tensão e faz a comparação com a norma adotada.

Logo após, MTFILTRO perguntará, assim como no item -a-, se é desejado instalar um outro filtro ou alterar algum filtro já instalado.

d - Opção Voltar ao arquivo base:

Caso o usuário deseje começar todo o processo novamente, a partir do arquivo base, deve optar por Voltar ao arquivo base. O programa MTFILTRO retira todos os filtros instalados (menos os para correção do fator de potência, se houver) e começa todo o procedimento para correção dos fatores de distorção de tensão do sistema novamente.

O programa entra então em um "loop" descrito no item 3.4, até que todos os fatores de distorção de tensão fiquem abaixo do máximo permitido pela norma adotada. Quando todos os fatores de distorção de tensão verificarem, o programa entrará então na etapa de verificação de U_{teste} e Q_{teste} .

Cada vez que se escolhe a opção Continuar (Instalar novo filtro ou alterar filtro já instalado) ou a opção retirar algum filtro, o número de manobras efetuado aumenta em uma unidade.

Cada vez que se escolhe a opção Voltar à situação anterior, o número de manobras é decrementado de uma unidade. E ao se escolher a opção Voltar ao arquivo base, o número de manobras é reduzido a zero.

O número de manobras efetuado é mostrado no canto inferior direito da tela do Menu "Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro, Voltar ao arquivo base". O número limite de manobras para o programa MTFILTRO é de 25.



3.5 - ETAPA DE VERIFICAÇÃO DE U_{teste} E Q_{teste} PARA OS FILTROS DE HARMÔNICOS

Ao entrar nesta etapa, o programa MTFILTRO calcula para cada filtro, os valores de U_{teste} e Q_{teste} , usando as equações 56 e 58 do capítulo II. Se todos estes valores verificam (são menores que os valores de U_{BCN} e Q_{BCN} respectivamente para cada filtro), MTFILTRO encerra esta etapa dizendo através de uma mensagem que os filtros estão aprovados.

Caso contrário, o programa mostra os valores de U_{BCN} , Q_{BCN} , U_{teste} e Q_{teste} para cada filtro indicando aquele que não verifica. Pergunta a seguir se deseja instalar outro filtro ou alterar algum filtro já instalado.

Tem-se novamente a situação do item anterior. A exceção é de que aqui os fatores de distorção de tensão estão abaixo do máximo permitido pela norma adotada. Após cada manobra, se algum fator de distorção de tensão ficar acima do permitido pela norma adotada, MTFILTRO anulará a manobra, exibindo uma mensagem ao usuário. A seguir, mostra os valores de U_{BCN} , Q_{BCN} , U_{teste} e Q_{teste} para cada filtro.

O programa entrará novamente num "loop" do mesmo tipo do item anterior, com um "menu" para Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro ou Voltar ao arquivo base desta etapa. MTFILTRO ficará neste "loop" até que todos os filtros tenham os seus valores de Q_{teste} e U_{teste} verificados.

Quando todos os filtros estiverem verificados, MTFILTRO exibirá uma mensagem ao usuário certificando-o deste fato e entrará na etapa de verificação de contingências.

3.6 - ETAPA DE VERIFICAÇÃO DE CONTINGÊNCIAS

Ao entrar na etapa de verificação de contingências, o programa MTFILTRO exhibe ao usuário uma tela, certificando-o do fato.

A etapa de verificação se faz somente quando o número de filtros para correção do fator de potência mais o número de filtros para correção dos fatores de distorção de tensão for maior ou igual a dois.

O programa MTFILTRO pergunta o valor do fator de ressonância a ser utilizado. Normalmente se usa 1,1, ou seja, se a tensão eficaz em alguma barra após a retirada de algum filtro for 1,1 vezes maior que a tensão eficaz desta barra com todos os filtros (10% maior), isto caracteriza para o programa, ressonância.

O programa calcula então para cada barra do sistema, o valor da tensão eficaz com todos os filtros instalados, através da seguinte equação:

$$U_{ef} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}$$

Onde U_n é a tensão eficaz para um harmônico de ordem n.

Em seguida, o programa MTFILTRO retira um a um os filtros, monta o arquivo MICROTRAN e faz a simulação. Calcula, através do arquivo de saída, os valores das tensões eficazes em todas as barras do sistema com a mesma equação anterior. Calcula também para cada barra, o quociente entre a tensão eficaz depois e antes da retirada do filtro e exhibe o maior destes quocientes chamando-o de fator de sobretensão. Se este for maior que



o fator de ressonância adotado, isto caracteriza para MTFILTRO, como já foi dito, ressonância.

Em seguida, o programa MTFILTRO exibe os filtros, cuja retirada acarreta ressonância. Para cada um deles, o programa pede que seja retirado um outro filtro juntamente e faz a mesma seqüência anterior, verificando se há ou não ressonância. Persistindo a ressonância, MTFILTRO pede ao usuário que mude a opção, até que se escolha um filtro que retirado juntamente com o filtro "causador de ressonância" não resulte em ressonância.

O resultado desta etapa, MTFILTRO exibirá no arquivo de saída.

No arquivo de saída, MTFILTRO mostra os fatores de distorção de tensão antes e após a colocação dos filtros. Mostra também as especificações dos filtros e o resultado da etapa de verificação de contingências. Ver os exemplos do capítulo seguinte.

4 - PROGRAMAS UTILIZADOS POR MTFILTRO

O programa MTFILTRO, feito em linguagem de programação TURBO PASCAL, utiliza, como já visto, o programa MICROTRAN e outros programas relacionados a ele, como o HARMONIC.

Pelo seu grande tamanho, pelas várias variáveis utilizadas (variáveis simples e matriciais) e pelo fato de se ter de "chamar" várias vezes o programa MICROTRAN (além do HARMONIC), MTFILTRO utiliza uma grande quantidade de memória convencional. Por isto, o programa foi construído em modo DOS e foram utilizados alguns programas independentes, que são chamados por MTFILTRO durante a sua execução. São eles:

4.1 - PROGRAMA CORFIL.T.EXE

Neste programa, de utilização independente, podem-se escolher as cores de fundo e da letra, utilizados pelo programa MTFILTRO.

4.2 - PROGRAMA DISTORC.EXE

Programa que não pode ser utilizado em separado de MTFILTRO, serve para calcular os fatores de distorção de tensão para cada barra do sistema que estiver sendo analisado por MTFILTRO.

4.3 - PROGRAMA COMPARAR.EXE

Programa que não pode ser utilizado em separado de MTFILTRO, serve para fazer a comparação dos fatores de distorção de tensão calculados por DISTORC.EXE com a norma adotada.



4.4 - PROGRAMA MNORMA.EXE

Este programa exibe na tela as normas utilizadas por MTFILTRO, para que o usuário possa escolher uma delas.

4.5 - PROGRAMAS CAPA1.EXE, CAPA2.EXE E CAPA3.EXE

Estes programas exibem as telas quando se iniciam respectivamente a primeira, a segunda e a terceira parte de MTFILTRO.

4.6 - ARQUIVOS AUXI.TPU, RILDO.TPU E DIST.TPU

Arquivos que contêm rotinas utilizadas pelo programa MTFILTRO.

4.7 - PROGRAMAS MTF1.EXE, MTF2.EXE E CONTING.EXE

Programas utilizados quando se opta pelo modo alternativo de execução de MTFILTRO (ver o item 2 deste capítulo.) O programa MTFILTRO não funcionará se faltar um destes arquivos, mesmo que não esteja sendo utilizado o modo alternativo.

CAPÍTULO V

EXEMPLOS COM MTFILTRO



Este capítulo tem como objetivo apresentar os mesmos exemplos desenvolvidos no capítulo III, utilizando o programa MTFILTRO. Assim serão mostradas utilidades do programa desenvolvido.

A ordem dos exemplos é a mesma para que se possam comparar os resultados. Para não deixar a dissertação se tornar demasiadamente grande, é que se mostra aqui apenas o primeiro exemplo de forma detalhada. Para os outros exemplos, mostram-se apenas os resultados. Porém estes exemplos são mostrados de forma completa no caderno extra (que pode ser encontrado na biblioteca da Escola Federal de Engenharia de Itajubá) onde se podem acompanhar todos os detalhes.

EXEMPLO 1:

Ao se digitar MTFILTRO no "prompt do DOS", aparece uma tela de apresentação da primeira parte do programa.

Em seguida, é pedido o valor em [Hertz] da frequência fundamental do sistema a ser analisado. Digita-se 60.

O programa pergunta se o caso a ser analisado é oriundo de simulação ou medição. Digita-se neste caso M (medição), pois os dados dos harmônicos de corrente foram obtidos através de medição. O programa pede, então, o nome do arquivo base, que é caso1.dat (ver anexo1). Para o nome do arquivo de saída, digita-se, caso1.sai.

O programa executa o arquivo caso1.dat no programa MICROTRAN. Como não encontra dados referentes às tensões à frequência fundamental das barras, MTFILTRO pergunta em seguida, se é desejado estimar estas tensões em 1 [P.U.]. Digita-se N (não), em seguida, digita-se T (para se estimar um valor de tensão para todas as barras). Quando for perguntado o valor em [P.U.] das tensões das barras, digita-se 1,01 [P.U.], conforme o exemplo 1 do capítulo III.

O programa, então, calcula os fatores de distorção de tensão para as barras do sistema e pergunta se se deseja ver os resultados. Se for, digita-se S (sim). MTFILTRO mostra então o seguinte arquivo.

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	3.34	10.02
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	2.98	8.94
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	2.12	6.37



12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.67	5.02
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	1.01	3.03
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.85	2.51
Total	0.00	5.39	16.18

O programa MTFILTRO, pergunta os níveis de tensão (em [Volts]) para cada barra do sistema analisado. Digita-se 4160 para a barra FA, 4160 para a barra B8A e 480 para 2A. Assim, tem-se:

QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA FA?4160
QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA B8A?4160
QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA 2A?480

MTFILTRO pergunta, em seguida, o valor da potência de base, em [MVA]. Digita-se 100.

O programa pergunta ao usuário, se é preferível trabalhar em valores por unidade [P.U.] ou em valores no Sistema Internacional de Unidades (S.I.). Neste exemplo, preferiu-se digitar 1 (correspondente a trabalhar com valores em [P.U.]), como poderia ter-se digitado 2 (correspondente a trabalhar com valores no S.I.)

ENTRE COM O VALOR DE S_{BASE} EM [MVA]:100

O QUE PREFERE: TRABALHAR EM VALORES [P.U.] OU NO [S.I.]?1/2 (1)

O programa lista então, as normas que podem ser usadas.

ESCOLHA A NORMA A SER UTILIZADA:

- 1: IEEE STD 519 - 1992
- 2: SEN 21 1811 (1976-11-15) SWEDEN
- 3: G 5.3 (1976) UNITED KINGDON
- 4: RECOMENDAÇÃO ELETROBRÁS GCOI SCEL/CECE - FEV/93 ($P/U_{rede} \geq 69$ [kV])

Neste exemplo, escolhe-se a norma número 2 (SEN 21 1811 (1976-11-15) SWEDEN).

MTFILTRO pergunta se existe alguma barra onde não interessa verificar os fatores de distorção de tensão. Neste caso, existe; digita-se então S (sim). MTFILTRO pergunta então a barra. Digita-se 2A (ou seja, não se está interessado, neste exemplo, nos fatores de distorção de tensão desta barra, logo estes valores poderão ficar acima do máximo permitido pela norma adotada após a instalação dos filtros).



EXISTE ALGUMA BARRA ONDE NÃO LHE INTERESSA AS DISTORÇÕES? (S)

QUAL BARRA? 2A

MAIS ALGUMA? (N)

MTFILTRO pergunta se existe mais alguma barra nesta situação. Digita-se N (não). O programa faz a comparação dos fatores de distorção de tensão com a norma adotada e mostra o resultado.

HARMÔNICOS DE TENSÃO QUE ULTRAPASSARAM A NORMA PARA A BARRA B8A:

F.D. INDIVIDUAL PARA O HARMÔNICO DE ORDEM 5 ULTRAPASSOU A NORMA EM:0,84%.

F.D. INDIVIDUAL PARA O HARMÔNICO DE ORDEM 7 ULTRAPASSOU A NORMA EM:0,48%

O F.D. TOTAL DA BARRA B8A ULTRAPASSOU A NORMA EM 2,39%.

O programa pergunta se é desejado corrigir o fator de potência. Neste caso, digita-se N (não).

Inicia-se, então, a segunda parte do programa MTFILTRO.

É mostrada uma tela de apresentação e em seguida é apresentada uma sugestão, conforme dito no capítulo anterior.

MTFILTRO pergunta então, qual o tipo de filtro se deseja instalar, se sintonizado ou amortecido. Digita-se neste caso S (Sintonizado). Em seguida é perguntado pela barra onde se quer instalar o filtro e pela ordem (sintonia) do mesmo. Digita-se respectivamente B8A e 5.

O programa diz que $\xi = 1,2$ e pergunta se é desejado alterar. Responde-se N (não). Diz também que o fator de qualidade do filtro a ser instalado será de 30 e também pergunta se é desejado alterar. Responde-se também N (não).

SUGESTÃO: INSTALAR FILTRO

BARRA = B8A

ORDEM = 5

TIPO = SINTONIZADO

QUAL O TIPO DE FILTRO A INSTALAR? SINTONIZADO OU AMORTECIDO? S/A (S)

QUAL A BARRA? B8A

QUAL A ORDEM? 5

ZETA = 1,2. DESEJA ALTERAR? S/N (N)

FATOR DE QUALIDADE = 30, DESEJA ALTERAR? S/N (N)

O programa então calcula os parâmetros do filtro básico, monta o arquivo MICROTRAN do sistema com este filtro inserido e faz a simulação. Através dos harmônicos de corrente que circulam pelo filtro básico, obtidos do arquivo de saída, calcula os valores de U_{BC} e Q_{BC} , conforme mostrado no capítulo III.

É pedido então que se entre com um valor para U_{BCN} superior a 1,3468 [P.U.] (valor de U_{BC} calculado) e com um valor para Q_{BCN} superior a 1,100E-2 [P.U.] (valor de Q_{BC} calculado). Tem-se assim o filtro nominal. Entra-se respectivamente com 1,366 [P.U.] correspondente a 5602,9 [Volts] e 1,125E-2 [P.U.], que corresponde a 1125 [kVAr].



O programa afirma que usará como fator de qualidade o valor trinta e pergunta se é desejado alterar este valor. Responde-se N (não)

ENTRE COM UM VALOR PARA UBCN SUPERIOR A: 1.3467998269E+00[P.U.]:1.366
ENTRE COM UM VALOR PARA QBCN SUPERIOR A: 1.1004859439E-02[P.U.]:1.125E-2

FATOR DE QUALIDADE = 30.0. DESEJA ALTERAR? S/N (N)

MTFILTRO monta o arquivo contendo o filtro nominal e faz a simulação no MICROTRAN. Calcula os fatores de distorção de tensão e os mostra se for digitado S à pergunta:

DESEJA VER OS FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO? S/N (S)

Este sistema possui: 3 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	1.37	7.89
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	2.60	8.56
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	1.95	6.19
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.54	4.89
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.94	2.95
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.79	2.48
Total	0.00	4.04	14.59

O programa faz a comparação com a norma adotada e mostra o resultado:

HARMÔNICOS DE TENSÃO QUE ULTRAPASSARAM A NORMA PARA A BARRA B8A:

F.D. INDIVIDUAL PARA O HARMÔNICO DE ORDEM 7 ULTRAPASSOU A NORMA EM:0,10%.

O F.D. TOTAL DA BARRA B8A ULTRAPASSOU A NORMA EM 1,04%.

A seguir, o programa MTFILTRO apresenta uma tela com as opções: Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro e Voltar ao arquivo base.



O QUE DESEJA?

- C - Continuar
- V - Voltar à situação anterior
- R - Retirar algum filtro
- B - Voltar ao arquivo Base

(1)

Neste caso, as opções V, R e B se equivalem, pois tem-se apenas um filtro instalado (filtro de 5º harmônico) e se fez apenas uma manobra que foi a sua instalação. Deve-se apertar a tecla C (continuar).

O programa mostra então uma sugestão, que pode ser seguida ou não. Seguindo o exemplo 1 do capítulo III, o que se quer aqui é instalar um filtro tipo sintonizado de sétimo harmônico na barra B8A.

MTFILTRO pergunta se é desejado instalar novo filtro ou alterar filtro já instalado. Deve-se digitar então I (Instalar novo filtro). O programa pergunta se é desejado ver os filtros já instalados (no caso, apenas um filtro foi instalado). Se sim (digita-se S), MTFILTRO exhibe então o seguinte arquivo que contém os parâmetros do filtro instalado.

FILTRO NÚMERO: 1

TIPO=Sintonizado
ORDEM = 5
BARRA = B8A
UBCN = 1.3660000000E+00 [P.U.]
QBCN = 1.1250000000E-02 [P.U.]
R = 1.1389242548E+00 [P.U.]
XC1 = 1.6586275556E+02 [P.U.]
XR1 = 6.8335455289E+00 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 30
ZETA = 1.20

Após a exibição do arquivo que contém os dados do filtro instalado, o programa mostra uma sugestão e pergunta qual o tipo de filtro a instalar, a barra, a ordem, se quer alterar ξ e se quer alterar o fator de qualidade. Tem-se novamente:

SUGESTÃO: INSTALAR FILTRO
BARRA = B8A
ORDEM = 7
TIPO = SINTONIZADO

QUAL O TIPO DE FILTRO A INSTALAR? SINTONIZADO OU AMORTECIDO? S/A (S)

QUAL A BARRA?B8A
QUAL A ORDEM?7



ZETA = 1,2. DESEJA ALTERAR? S/N (N)

FATOR DE QUALIDADE = 30, DESEJA ALTERAR? S/N (N)

O programa calcula então os parâmetros do filtro básico, monta o arquivo do MICROTRAN e faz a simulação. Através dos dados obtidos do arquivo de saída da simulação, calcula os valores de U_{BC} e Q_{BC} , dando como resultados respectivamente 1,320 [P.U.] e 5,316E-3 [P.U.]

MTFILTRO pede então para o filtro nominal, os valores de U_{BCN} e Q_{BCN} superiores aos valores de U_{BC} e Q_{BC} calculados. Digita-se então, conforme exemplo 1 do capítulo III, 1,324 [P.U.] e 5,4E-3 [P.U.] respectivamente. Então, tem-se:

ENTRE COM UM VALOR PARA UBCN SUPERIOR A: 1.3103307368E+00[P.U.]:1.324
ENTRE COM UM VALOR PARA QBCN SUPERIOR A: 5.3164913289E-03[P.U.]:5.4E-3

FATOR DE QUALIDADE = 30.0. DESEJA ALTERAR? S/N (N)

O programa monta o arquivo com o filtro nominal, faz a simulação no MICROTRAN, calcula os fatores de distorção de tensão e os mostra se for desejado.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	1.41	7.92
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.16	7.00
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	1.75	6.00
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.41	4.76
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.86	2.88
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.73	2.42
Total	0.00	3.11	13.58

O programa faz a comparação com a norma adotada e mostra o resultado.

O F.D. TOTAL DA BARRA B8A ULTRAPASSOU A NORMA EM 0,11%.

A seguir, MTFILTRO apresenta a tela com as opções Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro, Voltar ao arquivo base. Poder-se-ia escolher a opção Voltar à



situação anterior, e o programa voltaria à instalação do filtro de 7^o harmônico (última manobra). Se optasse por retirar algum filtro, poder-se-ia retirar o filtro de 5^o harmônico ou o filtro de 7^o harmônico. Poderia também escolher a opção Voltar ao caso base, e o programa voltaria ao arquivo base (sem os filtros) e começaria novamente todo o processo. Porém, seguindo o exemplo 1 do capítulo III, escolhe-se a opção Continuar para se instalar um filtro sintonizado de 11^o harmônico na barra B8A.

Deve-se então digitar I (instalar) quando MTFILTRO perguntar se é desejado instalar novo filtro ou alterar filtro já instalado. O programa pergunta a seguir, se é desejado ver os filtros já instalados. Desta vez, opta-se por N (não).

MTFILTRO mostra então a seguinte tela:

SUGESTÃO: INSTALAR FILTRO BARRA = B8A ORDEM = 11 TIPO = AMORTECIDO
QUAL O TIPO DE FILTRO A INSTALAR? SINTONIZADO OU AMORTECIDO? S/A (S)
QUAL A BARRA? B8A QUAL A ORDEM? 11
ZETA = 1,2. DESEJA ALTERAR? S/N (N)
FATOR DE QUALIDADE = 30, DESEJA ALTERAR? S/N (N)

Recapitulando do capítulo anterior, MTFILTRO sugeriu filtro tipo amortecido, pois o maior fator de distorção individual de tensão que ocorreu (harmônico de ordem 11) não ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada. Apenas o fator de distorção total de tensão a ultrapassou. Neste exemplo, opta-se por filtro tipo sintonizado, barra B8A, 11^o harmônico, $\xi = 1,2$ e fator de qualidade igual a 30.

O programa calcula os parâmetros do filtro básico de 11^o harmônico, monta o arquivo e faz a simulação no MICROTRAN. Com os dos obtidos do arquivo de saída, MTFILTRO calcula os valores de U_{BC} e Q_{BC} dando como resultados 1,271 [P.U.] e 1,771E-3 [P.U.], que correspondem a 5286,9 [Volts] e 177104,7 [VAr] respectivamente.

MTFILTRO pede então para o filtro nominal, os valores de U_{BCN} e Q_{BCN} . Digita-se então 1,278 [P.U.] para U_{BCN} e 1,8E-3 [P.U.] para Q_{BCN} conforme o exemplo 1 do capítulo 3. Assim tem-se:

ENTRE COM UM VALOR PARA UBCN SUPERIOR A: 1.2708831218E+00[P.U.]:1.274 ENTRE COM UM VALOR PARA QBCN SUPERIOR A: 1,7711160855E-03[P.U.]:1.8E-3
FATOR DE QUALIDADE = 30.0. DESEJA ALTERAR? S/N (N)

O programa monta o arquivo com o filtro nominal, faz a simulação no MICROTRAN e calcula os fatores de distorção de tensão. Se for desejado ver estes valores, MTFILTRO mostra o arquivo:

Este sistema possui: 3 barras. Análise feita até o harmônico número: 19
--



FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	1.42	7.92
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.18	7.01
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.87	5.03
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.20	4.55
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.79	2.81
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.67	2.37
Total	0.00	2.58	13.09

Como nenhum fator de distorção de tensão ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada, MTFILTRO exibe a mensagem:

NENHUM FATOR DE DISTORÇÃO DE TENSÃO ULTRAPASSOU A NORMA ADOTADA.

MTFILTRO mostra a seguir o “menu” Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro, Voltar ao arquivo base. Opta-se por Continuar (C).

A seguir, o programa informa que os fatores de distorção de tensão estão corrigidos e que vai ser iniciada a etapa de verificação de U_{teste} e Q_{teste} dos filtros.

MTFILTRO calcula então o valor de U_{teste} e Q_{teste} para cada filtro instalado e avalia se este valor verifica ou não. Apresenta então a seguinte tela:

FILTRO NÚMERO:1 ORDEM=5.0 BARRA=B8A TIPO=Sintonizado:

UBCN = 1.3660000000E+00 [PU] UTESTE = 1.3839531972E+00 [PU]. (Não verifica)
 QBCN = 1.1250000000E-02 [PU] QTESTE = 9.6899704651E-03 [PU]. (Verifica)

FILTRO NÚMERO:2 ORDEM=7.0 BARRA=B8A TIPO=Sintonizado:

UBCN = 1.3240000000E+00 [PU] UTESTE = 1.3358103192E+00 [PU]. (Não verifica)
 QBCN = 5.4000000000E-03 [PU] QTESTE = 4.7718519459E-03 [PU]. (Verifica)

FILTRO NÚMERO:3 ORDEM=11.0 BARRA=B8A TIPO=Sintonizado:



UBCN = 1.2740000000E+00 [PU] UTESTE = 1.2853765835E+00 [PU]. (Não verifica)
QBCN = 1.8000000000E-03 [PU] QTESTE = 1.6178801080E-03 [PU]. (Verifica)

Como os valores de U_{teste} para todos os filtros não verificam, deve-se aumentar o valor da tensão nominal para cada filtro instalado, conforme o exemplo 1 do capítulo III. Assim, têm-se os seguintes valores:

Filtro de 5^o harmônico:

$U_{BCN} = 1,416$ [P.U.]
 $Q_{BCN} = 1,125E-2$ [P.U.]

Filtro de 7^o harmônico:

$U_{BCN} = 1,366$ [P.U.]
 $Q_{BCN} = 5,4E-3$ [P.U.]

Filtro de 11^o harmônico:

$U_{BCN} = 1,324$ [P.U.]
 $Q_{BCN} = 1,8E-3$ [P.U.]

O programa pergunta se é desejado instalar novo filtro ou alterar filtro já instalado. Opta-se agora por alterar filtro (A). MTFILTRO pergunta se é desejado ver os filtros novamente. Se sim, digita-se S, e MTFILTRO pergunta se se deseja ver todos os dados dos filtros ou apenas os dados da etapa de verificação.

QUE PREFERE: Instalar novo filtro ou Alterar filtro já colocado? I/A (A)
DESEJA VER OS FILTROS NOVAMENTE? S/N (S)
DESEJA VER TODOS OS DADOS DOS FILTROS OU APENAS A VERIFICAÇÃO? 1/2 (2)

A seguir, MTFILTRO pergunta qual o número do filtro a alterar. Para alterar o primeiro filtro (filtro de 5^o harmônico), digita-se 1. O programa MTFILTRO mostra os dados dos filtros perguntando se quer alterar ou não. Deseja-se apenas alterar o valor de tensão nominal do filtro, neste caso.

FILTRO NÚMERO: 1

BARRA - B8A. ALTERAR? S/N (N)
ORDEM = 5.0. ALTERAR? S/N (N)
TIPO = SINTONIZADO. TROCAR? S/N (N)
FATOR DE QUALIDADE = 30.0. ALTERAR? S/N (N)
UBCN = 1.3660000000E+00 [PU]. ALTERAR? S/N (S)
QBCN = 1.1250000000E-02 [PU]. ALTERAR? S/N (N)

ENTRE COM UM VALOR PARA UBCN EM [PU]: 1.416



MTFILTRO faz a alteração no filtro de 5º harmônico, calcula os parâmetros, monta o arquivo do MICROTRAN e faz a simulação. Em seguida, calcula os fatores de distorção de tensão e os mostra, se for assim, desejado.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	1.49	8.00
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.19	7.01
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.87	5.04
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.20	4.55
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.79	2.81
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.68	2.37
Total	0.00	2.63	13.14

Em seguida, informa que nenhum fator de distorção de tensão ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada, após a alteração efetuada no filtro número 1.

O programa mostra as opções Continuar, Voltar à situação anterior, Retirar algum filtro, Voltar ao arquivo base de verificação. Escolhe-se Continuar. Aqui, a opção Voltar ao arquivo base de verificação faz retornar ao arquivo com os filtros instalados antes de se entrar na etapa de verificação, anulando todas as "manobras" feitas nesta etapa.

MTFILTRO calcula então os valores de U_{teste} e Q_{teste} para cada filtro e mostra o resultado.

FILTRO NÚMERO:1 ORDEM=5.0 BARRA=B8A TIPO=Sintonizado:

UBCN = 1.4160000000E+00 [PU] UTESTE = 1.3993984232E+00 [PU]. (Verifica)
QBCN = 1.1250000000E-02 [PU] QTESTE = 9.2967900108E-03 [PU]. (Verifica)

FILTRO NÚMERO:2 ORDEM=7.0 BARRA=B8A TIPO=Sintonizado:

UBCN = 1.3240000000E+00 [PU] UTESTE = 1.3382656780E+00 [PU]. (Não verifica)
QBCN = 5.4000000000E-03 [PU] QTESTE = 4.7838075415E-03 [PU]. (Verifica)



FILTRO NÚMERO:3 ORDEM=11.0 BARRA=B8A TIPO=Sintonizado:

UBCN = 1.2740000000E+00 [PU] UTESTE = 1.2869462628E+00 [PU]. (Não verifica)
QBCN = 1.8000000000E-03 [PU] QTESTE = 1.6202943469E-03 [PU]. (Verifica)

Deve-se alterar, em seguida, da mesma forma, os valores de U_{BCN} para o filtro de 7^o harmônico (filtro número 2) e para o filtro de 11^o harmônico (filtro número 3)

Após as alterações, têm-se os seguintes fatores de distorção de tensão calculados pelo programa:

Este sistema possui: 3 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	1.49	7.99
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.23	7.06
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.91	5.08
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.22	4.57
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.80	2.82
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.68	2.38
Total	0.00	2.68	13.19

Nenhum fator de distorção de tensão ultrapassou o máximo permitido pela norma adotada. MTFILTRO calcula os valores de U_{teste} e Q_{teste} para os filtros, e verifica que estes estão abaixo de seus respectivos valores de U_{BCN} e Q_{BCN} . Sendo assim, os filtros estão aprovados. MTFILTRO mostra a tela:

TODOS OS UTESTE E QTESTE VERIFICAM.

OS FILTROS ESTÃO APROVADOS.

DESEJA VER OS FILTROS INSTALADOS? S/N (S)

DESEJA VER TODOS OS DADOS DOS FILTROS OU APENAS A VERIFICAÇÃO? 1 / 2 (1)

Então, MTFILTRO mostra o seguinte arquivo:



FILTRO NÚMERO: 1

TIPO=Sintonizado
ORDEM = 5
BARRA = B8A
UBCN = 1.4160000000E+00 [P.U.]
QBCN = 1.1250000000E-02 [P.U.]
R = 1.2238267733E+00 [P.U.]
XC1 = 1.7822720000E+02 [P.U.]
XR1 = 7.3429606400E+00 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 30
ZETA = 1.20
UTESTE = 1.3992290561E+00 [P.U.]
QTESTE = 9.2831677459E-03 [P.U.]

FILTRO NÚMERO: 2

TIPO=Sintonizado
ORDEM = 7
BARRA = B8A
UBCN = 1.3660000000E+00 [P.U.]
QBCN = 5.4000000000E-03 [P.U.]
R = 1.6948277601E+00 [P.U.]
XC1 = 3.4554740741E+02 [P.U.]
XR1 = 7.2635475435E+00 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 30
ZETA = 1.20
UTESTE = 1.3485108143E+00 [P.U.]
QTESTE = 4.6022081029E-03 [P.U.]

FILTRO NÚMERO: 3

TIPO=Sintonizado
ORDEM = 11
BARRA = B8A
UBCN = 1.3240000000E+00 [P.U.]
QBCN = 1.8000000000E-03 [P.U.]
R = 3.0396721886E+00 [P.U.]
XC1 = 9.7387555556E+02 [P.U.]
XR1 = 8.2900150597E+00 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 30
ZETA = 1.20
UTESTE = 1.2971264008E+00 [P.U.]
QTESTE = 1.5404961569E-03 [P.U.]

O programa entra então na terceira parte, ou seja, na etapa de verificação de contingências. É mostrada uma tela de apresentação, e a mensagem:



ETAPA DE VERIFICAÇÃO DE RESSONÂNCIA.

FATOR DE RESSONÂNCIA =1,1. MUDAR? S/N (N)

O programa MTFILTRO calcula, então, para cada barra, o valor da tensão eficaz. Em seguida, retira o primeiro filtro e faz a simulação no MICROTRAN.

RETIRANDO O FILTRO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS, NÚMERO:1.

Em seguida, calcula, conforme mostrado no capítulo IV, o fator de sobretensão. Apresenta então a tela:

NÃO HÁ PROBLEMA DE RESSONÂNCIA QUANDO SE RETIRA O FILTRO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS, NÚMERO:1

FATOR DE SOBRETENSÃO = 1.000593957E+00

Isto significa que a maior tensão eficaz de barra, quando se retira o filtro número 1 é 1,0005936957 vezes a tensão eficaz nesta barra, com todos os filtros no sistema. Portanto, menor que 1,1 (10% de sobretensão), o que não caracteriza ressonância.

Em seguida, MTFILTRO faz o mesmo procedimento para os filtros números 2 e 3, resultando:

NÃO HÁ PROBLEMA DE RESSONÂNCIA QUANDO SE RETIRA O FILTRO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS, NÚMERO:2

FATOR DE SOBRETENSÃO = 1.000314020E+00

NÃO HÁ PROBLEMA DE RESSONÂNCIA QUANDO SE RETIRA O FILTRO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS, NÚMERO:2

FATOR DE SOBRETENSÃO = 1.000148551E+00

MTFILTRO apresenta então uma mensagem indicando que não há nenhum problema de ressonância e que os resultados estão no arquivo caso1.sai, que foi o nome do arquivo de saída digitado no início do procedimento.

Este arquivo é mostrado em seguida:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.

Este sistema possui: 3 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n FA B8A 2A



2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	3.34	10.02
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	2.98	8.94
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	2.12	6.37
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.67	5.02
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	1.01	3.03
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.85	2.54
Total	0.00	5.39	16.18

SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	1.49	7.99
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.23	7.06
8	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.91	5.08
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	1.22	4.57
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.80	2.82
18	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.68	2.38
Total	0.00	2.68	13.19

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO : 1
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B8A



TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 5.000000000E+00
UBCN = 1.416000000E+00 [P.U.]
QBCN = 1.125000000E-02 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.000000000E+01
ZETA = 1.200000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B8A
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 7.000000000E+00
UBCN = 1.366000000E+00 [P.U.]
QBCN = 5.400000000E-03 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.000000000E+01
ZETA = 1.200000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B8A
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 1.100000000E+01
UBCN = 1.324000000E+00 [P.U.]
QBCN = 1.800000000E-03 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.000000000E+01
ZETA = 1.200000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.
PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

EXEMPLO 2

Como neste exemplo, os dados referentes aos harmônicos de corrente da carga elétrica especial são obtidos através de simulação, a entrada de dados para o programa MTFILTRO é um pouco diferente da do exemplo anterior. Assim, é mostrada apenas a entrada de dados referentes à simulação. Após a apresentação da primeira parte do programa, é pedido o valor da frequência fundamental do sistema a ser analisado. Deve-se entrar com o valor 60 [Hz].

O programa pergunta se o caso analisado é de simulação ou medição, então digita-se S (simulação). MTFILTRO a seguir pergunta o nome do arquivo do sistema trifásico a analisar, digita-se "ponte1.dat" (ver anexo 12). Em seguida o programa pede o arquivo do sistema monofásico equivalente (ver capítulo anterior), digita-se "mono.dat". Para o arquivo de saída, usa-se o arquivo "caso2.sai". Assim, tem-se:

ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO "TRIFÁSICO" A ANALISAR: PONTE1.DAT



ARQUIVO "MONOFASICO" COM OS VALORES EM P.U. E SEM AS CEEs: MONO.DAT
ARQUIVO DE SAÍDA: CASO2.SAI

MTFILTRO simula no programa MICROTRAN o arquivo PONTE1.SAI. Em seguida, o programa consulta se existe o arquivo de parâmetros do HARMONIC. Se não existe, mostra uma mensagem ao usuário, certificando-o disto. Em seguida, pergunta pela frequência nominal, instante de início de análise e o número de harmônicos a analisar.

ENTRE COM A FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL: 60
ENTRE COM O INSTANTE DO INÍCIO DA ANÁLISE: 0.0
ENTRE COM O NÚMERO DE HARMÔNICOS A ANALISAR: 19

A seguir, MTFILTRO pergunta se o circuito trifásico está referido a um nível de tensão. Neste caso, sim, os parâmetros do circuito estão referidos ao nível de tensão de 480 [Volts] (ver figura 8 do capítulo III).

MTFILTRO pede, a seguir, para que se escolha durante a execução do programa HARMONIC, a corrente a ser analisada. Esta corrente é a que será decomposta em componentes trigonométricas de Fourier para a obtenção dos harmônicos da Carga Elétrica Especial. Ao aparecer a "tela do HARMONIC", deve-se escolher a corrente de ramo número 26 (Barra B8A para barra 2A). MTFILTRO pergunta, em seguida, se há mais alguma fonte de harmônicos. Neste caso, não.

O programa faz algumas alterações no cartão de tempo do arquivo "ponte1.dat" (ver capítulo anterior), simula no MICROTRAN e calcula a tensão à frequência fundamental para cada barra do sistema analisado. Em seguida, pede os níveis de tensão das barras e o valor da potência de base.

QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA FA? 4160
QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA B8A? 4160
QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA 2A? 480

ENTRE COM O VALOR DA POTÊNCIA DE BASE EM [MVA]: 100

O programa solicita, a seguir, confirmação para colocar as fontes de corrente injetadas (dos harmônicos de corrente calculados) na barra 2A. Digita-se S (sim) para confirmar.

MTFILTRO monta, então, o arquivo monofásico, com as fontes de corrente, faz a simulação no MICROTRAN e com o arquivo de saída deste, calcula os fatores de distorção de tensão das barras, resultando:

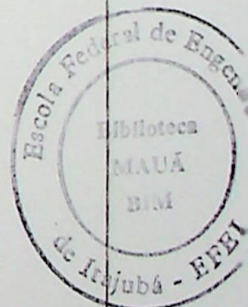
SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE SIMULAÇÃO.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n FA B8A 2A





2	0.00	0.26	0.78
3	0.00	0.35	1.05
4	0.00	0.51	1.52
5	0.00	3.74	11.22
6	0.00	0.68	2.04
7	0.00	2.87	8.60
8	0.00	0.98	2.93
9	0.00	0.97	2.90
10	0.00	1.13	3.40
11	0.00	3.24	9.71
12	0.00	1.20	3.60
13	0.00	1.73	5.18
14	0.00	1.46	4.37
15	0.00	1.35	4.06
16	0.00	1.46	4.39
17	0.00	2.22	6.67
18	0.00	1.44	4.31
19	0.00	0.50	1.49
Total	0.00	7.39	22.16

MTFILTRO faz, interagindo com o usuário, o cálculo dos parâmetros dos filtros a serem instalados, resultando o seguinte arquivo de saída (para maiores detalhes, ver o caderno extra):

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE SIMULAÇÃO.

Este sistema possui: 3 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.26	0.78
3	0.00	0.35	1.05
4	0.00	0.51	1.52
5	0.00	3.74	11.22
6	0.00	0.68	2.04
7	0.00	2.87	8.60
8	0.00	0.98	2.93
9	0.00	0.97	2.90
10	0.00	1.13	3.40
11	0.00	3.24	9.71
12	0.00	1.20	3.60
13	0.00	1.73	5.18
14	0.00	1.46	4.37
15	0.00	1.35	4.06
16	0.00	1.46	4.39
17	0.00	2.22	6.67
18	0.00	1.44	4.31
19	0.00	0.50	1.49
Total	0.00	7.39	22.16



SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.27	0.79
3	0.00	0.37	1.07
4	0.00	0.60	1.62
5	0.00	1.76	9.05
6	0.00	0.68	2.04
7	0.00	1.42	7.04
8	0.00	0.81	2.76
9	0.00	0.93	2.86
10	0.00	1.48	3.74
11	0.00	1.22	7.56
12	0.00	0.77	3.17
13	0.00	1.24	4.69
14	0.00	1.10	4.01
15	0.00	1.05	3.76
16	0.00	1.15	4.07
17	0.00	1.77	6.22
18	0.00	1.15	4.02
19	0.00	0.40	1.40
Total	0.00	4.66	19.04

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO :1

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B8A

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM = 5.0000000000E+00

UBCN = 6.6144000000E+03 [Volts].

QBCN = 1.2900000000E+06 [Var].

FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01

ZETA = 1.2000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B8A

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM = 1.1000000000E+01

UBCN = 6.9801600000E+03 [Volts].

QBCN = 3.6750000000E+05 [Var].

FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01

ZETA = 1.2000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3



OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B8A

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM - 7.0000000000E+00

UBCN = 6.6144000000E+03 [Volts].

QBCN = 5.4000000000E+05 [Var].

FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01

ZETA - 1.2000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.

PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

EXEMPLO 3

Este exemplo equivale ao anterior. Serve para mostrar que no arquivo do sistema trifásico de entrada, pode-se entrar com o modelo de transformador do MICROTRAN. Assim ter-se-ão níveis diferentes de tensão para cada barra. Apresentam-se algumas diferenças na entrada de dados em relação ao exemplo anterior. Serão mostrados aqui apenas estas diferenças. Após a tela de apresentação, digita-se 60 para a frequência fundamental do sistema a ser analisado. Em seguida, opta-se por "simulação" à pergunta feita por MTFILTRO:

RESULTADO DE SIMULAÇÃO OU MEDIÇÃO? S/M (S)

Em seguida, MTFILTRO pergunta os arquivos de entrada. Entra-se respectivamente com (ver do exemplo 3, capítulo III), "ttt.dat", "mono.dat" e "caso3.sai".

ENTRE COM O NOME DO ARQUIVO "TRIFÁSICO" A ANALISAR: TTT.DAT
ARQUIVO "MONOFÁSICO" COM OS VALORES EM P.U. E SEM AS CEEs: MONO.DAT
ARQUIVO DE SAÍDA: CASO3.SAI

MTFILTRO simula no MICROTRAN o arquivo "ttt.dat". Em seguida, mostra os dados do arquivo de parâmetros utilizados no exemplo anterior. Pergunta se se deseja alteração. Responde-se N (não).

A FREQUÊNCIA DE ANÁLISE É DE: 60 [Hz]

O INSTANTE INICIAL DE ANÁLISE É DE 0.00 Segundos

O NÚMERO DE HARMÔNICOS PARA ANÁLISE É DE: 19

DESEJA ALTERAR ALGO? S/N (N)



O programa a seguir, pergunta se o circuito trifásico está referido a algum nível de tensão. Desta vez responde-se N (não), pois foi usado o modelo de transformador do MICROTRAN e não o modelo "RL" como no exemplo anterior.

MTFILTRO pede, a seguir, que se escolha durante a execução do programa HARMONIC, a corrente a ser decomposta em componentes trigonométricas de Fourier. Escolhe-se a correspondente ao número 25 (corrente da barra 2A para a barra fictícia 3A, ver exemplo 3 capítulo III). Em seguida se diz N (não) à pergunta feita por MTFILTRO, se existe mais alguma fonte de harmônicos.

MAIS ALGUMA FONTE DE HARMÔNICOS? S/N (N)

MTFILTRO faz algumas alterações no arquivo "ttt.dat" (alterações no cartão de tempo deste arquivo), simula no MICROTRAN e calcula a tensão à frequência fundamental para cada barra do sistema.

Em seguida, pede os níveis de tensão das barras e o valor da potência de base a ser utilizado.

QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA FA? 4160
QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA B8A? 4160
QUAL O NÍVEL (EM VOLTS) DE TENSÃO DA BARRA 2A? 480

ENTRE COM O VALOR DA POTÊNCIA DE BASE EM [MVA]: 100

O programa pede confirmação para colocar as fontes de corrente injetadas (dos harmônicos de corrente calculados da análise de Fourier) na barra 3A. Como esta é uma barra fictícia do circuito trifásico, ela não existe no circuito monofásico correspondente. As fontes de corrente devem ser colocadas na barra 2A do circuito monofásico.

Então, tem-se:

FONTE DE HARMÔNICOS NÚMERO: 1
BARRA A COLOCAR AS FONTES DE CORRENTE = 3A. CONFIRMAR? S/N (N)

BARRA:(2A)

MTFILTRO monta então o arquivo base, com as fontes de corrente, faz a simulação no MICROTRAN e com o arquivo de saída deste, calcula os fatores de distorção de tensão da barras, resultando:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE SIMULAÇÃO.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):



n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.26	0.78
3	0.00	0.35	1.05
4	0.00	0.51	1.52
5	0.00	3.74	11.22
6	0.00	0.68	2.04
7	0.00	2.87	8.60
8	0.00	0.98	2.93
9	0.00	0.97	2.90
10	0.00	1.13	3.40
11	0.00	3.24	9.71
12	0.00	1.20	3.60
13	0.00	1.73	5.18
14	0.00	1.46	4.37
15	0.00	1.35	4.06
16	0.00	1.46	4.39
17	0.00	2.22	6.67
18	0.00	1.44	4.31
19	0.00	0.50	1.49
Total	0.00	7.39	22.16

Nota-se que os fatores de distorção de tensão, como não poderiam deixar de ser, são os mesmos apresentados no exemplo anterior. Portanto, o procedimento daqui para frente é o mesmo do referido exemplo.

EXEMPLO 4

Os resultados fornecidos pelo programa MTFILTRO para este exemplo (exemplo 4 do capítulo III) são:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.

Este sistema possui: 5 barras.

Análise feita até o harmônico número: 25

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B10	B20	B300	B200	B100
2	0.55	0.55	0.75	1.84	0.59
3	0.87	0.87	1.20	2.83	1.10
4	0.55	0.55	0.76	1.55	1.22
5	0.77	0.77	1.26	2.20	1.18
6	0.31	0.31	0.49	0.83	0.61
7	0.63	0.63	1.03	1.73	1.10
8	0.47	0.47	0.71	1.44	0.63
9	0.41	0.41	0.70	1.17	0.64
10	0.32	0.32	0.56	0.88	0.47
11	0.70	0.71	1.29	1.89	1.07
12	0.41	0.41	0.70	1.16	0.60
13	0.66	0.66	1.52	1.49	0.95



14	0.39	0.39	0.78	0.97	0.59
15	0.51	0.51	1.05	1.26	0.73
16	0.49	0.49	0.96	1.29	0.70
17	0.63	0.63	1.29	1.60	0.86
18	0.47	0.47	0.96	1.17	0.73
19	0.43	0.43	0.81	1.10	0.74
20	0.42	0.42	0.77	1.13	0.65
21	0.64	0.64	1.42	1.48	0.94
22	0.49	0.50	1.03	1.21	0.74
23	0.62	0.62	1.13	1.67	0.95
24	0.51	0.51	1.02	1.26	0.81
25	0.61	0.61	1.20	1.52	1.00
Total	2.70	2.71	4.95	7.39	4.13

SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 5 barras.
Análise feita até o harmônico número: 25

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B10	B20	B300	B200	B100
2	0.34	0.34	0.54	1.08	0.38
3	0.36	0.36	0.69	0.97	0.59
4	0.50	0.50	0.71	1.36	1.17
5	0.45	0.45	0.93	1.04	0.85
6	0.27	0.27	0.45	0.68	0.57
7	0.41	0.41	0.81	0.94	0.88
8	0.37	0.37	0.62	1.08	0.54
9	0.35	0.36	0.64	0.95	0.58
10	0.29	0.29	0.54	0.79	0.44
11	0.47	0.48	1.06	1.05	0.84
12	0.32	0.32	0.61	0.82	0.51
13	0.56	0.56	1.42	1.10	0.85
14	0.32	0.33	0.72	0.73	0.52
15	0.43	0.43	0.97	0.97	0.66
16	0.41	0.42	0.88	1.00	0.62
17	0.53	0.54	1.20	1.25	0.76
18	0.40	0.40	0.89	0.91	0.67
19	0.37	0.37	0.75	0.86	0.67
20	0.36	0.36	0.70	0.88	0.59
21	0.55	0.55	1.33	1.16	0.85
22	0.43	0.43	0.96	0.96	0.67
23	0.53	0.53	1.03	1.32	0.86
24	0.44	0.44	0.95	0.99	0.74
25	0.52	0.53	1.11	1.20	0.92
Total	2.08	2.09	4.36	4.99	3.53

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO :1

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.



BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 3.0000000000E+00
UBCN = 1.4960000000E+00 [P.U.]
QBCN = 4.5000000000E-03 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 5.0000000000E+00
UBCN = 1.4960000000E+00 [P.U.]
QBCN = 9.0000000000E-04 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 2.0000000000E+00
UBCN = 1.7320000000E+00 [P.U.]
QBCN = 6.0000000000E-03 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.4000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :4
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 1.1000000000E+01
UBCN = 1.7320000000E+00 [P.U.]
QBCN = 1.5000000000E-04 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :5
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 7.0000000000E+00
UBCN = 1.4960000000E+00 [P.U.]
QBCN = 3.0000000000E-04 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.



PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

Escolhendo-se trabalhar com valores no Sistema Internacional de Unidades [S.I.], ter-se-á o seguinte arquivo de saída de resultados (não mostrando aqui novamente os fatores de distorção de tensão, que são os mesmos do arquivo de saída anterior).

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO :1
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 3.0000194829E+00
UBCN = 6.5818277781E+02 [Volts].
QBCN = 4.5000000000E+05 [VAr].
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000094314E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 5.0000324714E+00
UBCN = 6.5818277781E+02 [Volts].
QBCN = 9.0000000000E+04 [VAr].
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000270041E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 1.9999933065E+00
UBCN = 7.6209982483E+02 [Volts].
QBCN = 6.0000000000E+05 [VAr].
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000017683E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :4
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 1.0999873633E+01
UBCN = 7.6207109616E+02 [Volts].
QBCN = 1.5000000000E+04 [VAr].
FATOR DE QUALIDADE = 2.9999441865E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.





FILTRO NÚMERO :5
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B200
TIPO - SINTONIZADO.
ORDEM = 7.0000021776E+00
UBCN = 6.5817660879E+02 [Volts].
QBCN = 3.0000000000E+04 [VAr].
FATOR DE QUALIDADE = 2.9999776013E+01
ZETA = 1.2000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.
PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

EXEMPLO 5

Para o exemplo 5 do capítulo III, o programa MTFILTRO fornece os seguintes resultados:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.

Este sistema possui: 5 barras.
Análise feita até o harmônico número: 25

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B10	B20	B300	B200	B100
2	0.55	0.55	0.75	1.84	0.59
3	0.87	0.87	1.20	2.83	1.10
4	0.55	0.55	0.76	1.55	1.22
5	0.77	0.77	1.26	2.20	1.18
6	0.31	0.31	0.49	0.83	0.61
7	0.63	0.63	1.03	1.73	1.10
8	0.47	0.47	0.71	1.44	0.63
9	0.41	0.41	0.70	1.17	0.64
10	0.32	0.32	0.56	0.88	0.47
11	0.70	0.71	1.29	1.89	1.07
12	0.41	0.41	0.70	1.16	0.60
13	0.66	0.66	1.52	1.49	0.95
14	0.39	0.39	0.78	0.97	0.59
15	0.51	0.51	1.05	1.26	0.73
16	0.49	0.49	0.96	1.29	0.70
17	0.63	0.63	1.29	1.60	0.86
18	0.47	0.47	0.96	1.17	0.73
19	0.43	0.43	0.81	1.10	0.74
20	0.42	0.42	0.77	1.13	0.65
21	0.64	0.64	1.42	1.48	0.94
22	0.49	0.50	1.03	1.21	0.74



23	0.62	0.62	1.13	1.67	0.95
24	0.51	0.51	1.02	1.26	0.81
25	0.61	0.61	1.20	1.52	1.00
Total	2.70	2.71	4.95	7.39	4.13

SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 5 barras.
Análise feita até o harmônico número: 25

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B10	B20	B300	B200	B100
2	0.34	0.34	0.54	1.07	0.38
3	0.36	0.36	0.70	0.93	0.60
4	0.52	0.52	0.73	1.43	1.19
5	0.44	0.44	0.93	0.97	0.85
6	0.29	0.29	0.47	0.76	0.59
7	0.37	0.37	0.77	0.75	0.84
8	0.40	0.40	0.64	1.17	0.56
9	0.38	0.38	0.66	1.04	0.60
10	0.33	0.33	0.57	0.91	0.47
11	0.44	0.44	1.02	0.88	0.80
12	0.39	0.40	0.68	1.10	0.59
13	0.41	0.41	1.27	0.54	0.70
14	0.30	0.30	0.69	0.63	0.50
15	0.41	0.41	0.95	0.90	0.64
16	0.40	0.40	0.87	0.95	0.61
17	0.52	0.53	1.19	1.21	0.75
18	0.40	0.40	0.89	0.89	0.66
19	0.36	0.36	0.74	0.85	0.67
20	0.35	0.35	0.70	0.87	0.59
21	0.55	0.55	1.33	1.15	0.85
22	0.43	0.43	0.96	0.95	0.67
23	0.52	0.53	1.03	1.31	0.86
24	0.44	0.44	0.95	0.99	0.74
25	0.52	0.53	1.11	1.20	0.92
Total	2.04	2.05	4.31	4.89	3.49

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO :1

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B200

TIPO = AMORTECIDO.

ORDEM = 3.0000000000E+00

UBCN = 6.5817900000E+02 [Volts].

QBCN = 3.0000000000E+05 [Var].

FATOR DE QUALIDADE = 1.0000000000E+01

ZETA = 1.2000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2



OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B200

TIPO = AMORTECIDO.

ORDEM = 5.000000000E+00

UBCN = 6.581790000E+02 [Volts].

QBCN = 6.000000000E+04 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B200

TIPO - AMORTECIDO.

ORDEM = 2.000000000E+00

UBCN = 7.621000000E+02 [Volts].

QBCN = 4.800000000E+05 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :4

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B200

TIPO = AMORTECIDO.

ORDEM = 1.100000000E+01

UBCN = 7.621000000E+02 [Volts].

QBCN = 1.500000000E+04 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :5

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B200

TIPO = AMORTECIDO.

ORDEM = 7.000000000E+00

UBCN = 6.581800000E+02 [Volts].

QBCN = 3.000000000E+04 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :6

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B200

TIPO = AMORTECIDO.

ORDEM = 1.300000000E+01

UBCN = 7.621000000E+02 [Volts].

QBCN = 1.500000000E+04 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.



NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.
PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

EXEMPLO 6

Para o exemplo 6 do capítulo III, o programa MTFILTRO apresenta os seguintes resultados:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.

Este sistema possui: 1 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B
2	0.00
3	0.21
4	0.12
5	0.71
6	0.00
7	0.48
8	0.00
9	0.57
10	0.00
11	8.58
12	0.34
13	6.44
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	1.16
18	0.00
19	2.69

Total 11.18

SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 1 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B
2	0.00
3	0.21
4	0.13
5	0.80
6	0.00
7	0.71



8	0.00
9	0.67
10	0.00
11	0.90
12	0.11
13	2.76
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	0.68
18	0.00
19	1.66
Total	3.66

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO :1

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM = 1.1000000000E+01

UBCN = 1.3710000000E+00 [P.U.]

QBCN = 2.4450000000E-02 [P.U.]

FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01

ZETA = 1.1000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM = 9.0000000000E+00

UBCN = 1.2430000000E+00 [P.U.]

QBCN = 2.4000000000E-03 [P.U.]

FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01

ZETA = 1.2000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.

PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

A título de ilustração, por existirem problemas de ressonância, serão mostrados aqui, usando o programa MTFILTRO, os filtros que foram instalados no exemplo feito em [1].

Foram instalados três filtros, sendo:

Filtro de 11º harmônico (filtro número 1)

$\xi = 1,1$

$U_{BCN} = 15,24 \text{ [kV]} = 1,115 \text{ [P.U.]}$

(Tensão de base = 13800 [Volts])



$Q_{BCN} = 7,2 \text{ [MVar]} = 7.2E-2 \text{ [P.U.]}$ (Potência de base = 100 [MVA])
 Fator de qualidade = 30.
 Conexão: Estrela isolada

Filtro de 7º harmônico (filtro número 2)

$\xi = 1,15$
 $U_{BCN} = 19,93 \text{ [kV]} = 1,44 \text{ [P.U.]}$
 $Q_{BCN} = 0,780 \text{ [MVar]} = 7.8E-3 \text{ [P.U.]}$
 Fator de qualidade = 30.
 Conexão: Estrela isolada

Filtro de 13º harmônico (filtro número 3)

$\xi = 1,1$
 $U_{BCN} = 16,62 \text{ [kV]} = 1,204 \text{ [P.U.]}$
 $Q_{BCN} = 1,380 \text{ [MVar]} = 1.38E-23 \text{ [P.U.]}$
 Fator de qualidade = 30.
 Conexão: Estrela isolada

Assim, o programa MTFILTRO apresenta os seguintes resultados:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:	
ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.	
Este sistema possui: 1 barras.	
Análise feita até o harmônico número: 19	
FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):	
n	B
2	0.00
3	0.21
4	0.12
5	0.71
6	0.00
7	0.48
8	0.00
9	0.57
10	0.00
11	8.58
12	0.34
13	6.44
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	1.16
18	0.00
19	2.69
Total	11.18



SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 1 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B
2	0.00
3	0.25
4	0.18
5	1.73
6	0.00
7	0.55
8	0.00
9	0.18
10	0.00
11	0.22
12	0.04
13	0.41
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	0.24
18	0.00
19	0.62
Total	2.03

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO :1
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 1.1000000000E+01
UBCN = 1.1150000000E+00 [P.U.]
QBCN = 7.2000000000E-02 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.1000000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2
OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.
BARRA = B
TIPO = SINTONIZADO.
ORDEM = 7.0000000000E+00
UBCN = 1.4400000000E+00 [P.U.]
QBCN = 7.8000000000E-03 [P.U.]
FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01
ZETA = 1.1500000000E+00
CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3



OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM = 1.3000000000E+01

UBCN = 1.2040000000E+00 [P.U.]

QBCN = 1.3800000000E-02 [P.U.]

FATOR DE QUALIDADE = 3.0000000000E+01

ZETA = 1.1000000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

PROBLEMA DE RESSONÂNCIA COM FILTRO NÚMERO:1

PARA NÃO HAVER PROBLEMA COM RESSONÂNCIA, RETIRAR JUNTAMENTE COM FILTRO NÚMERO:

3

EXEMPLO 7

Este exemplo é feito para a correção do fator de potência do mesmo sistema do exemplo 2.

Portanto, segue-se o mesmo procedimento descrito no exemplo 2, até MTFILTRO fazer a pergunta se é desejado corrigir o fator de potência. Digita-se agora S (sim).

DESEJA CORRIGIR F.P. ? S/N (S)

O programa a seguir, faz a pergunta.

EM QUAL BARRA DESEJA INSTALAR O FILTRO PARA CORREÇÃO DO F.P. ? B8A

MTFILTRO pergunta, então, pela tensão e pela corrente, para ser feita análise trigonométrica de Fourier, visando a calcular a potência ativa atual e o fator de potência atual.

Do exemplo 7 do capítulo III, escolhe-se a tensão da barra B8A e a corrente entre os ramos B8A e 2A.

O programa pergunta, a seguir, se existe mais alguma corrente necessária para o cálculo deste fator de potência (ver capítulo anterior). Digita-se N (não).

MTFILTRO calcula, então, com as equações apresentadas no exemplo 7 do capítulo III, os valores do fator de potência e potência ativa, resultando:

FATOR DE POTÊNCIA ATUAL = 0.80513668

P = 0.06189698 [P.U.]

MTFILTRO pergunta, agora, se é desejado corrigir o fator de potência para 0,94 e se a sintonia do filtro é para ser feita em 4,1. Neste exemplo, responde-se S (sim) para ambas as perguntas.

CORREÇÃO PARA 0,94? S/N (S)

SINTONIA EM 4,1? S/N (S)



MTFILTRO calcula os parâmetros do banco de capacitores inicial, monta o arquivo do MICROTRAN e faz a simulação. Com os harmônicos de corrente que circulam pelo banco de capacitores inicial, MTFILTRO calcula os parâmetros do filtro básico, monta o arquivo do MICROTRAN e faz a simulação.

Novamente, através do arquivo de saída do MICROTRAN, MTFILTRO lê os harmônicos de corrente que circulam pelo filtro básico, e com estes valores calcula o valor de U_{BC} e o valor de Q_{BC} que resultam respectivamente 5130 [Volts] e 3,16 [MVar].

MTFILTRO pede então os valores de U_{BCN} e Q_{BCN} para o filtro nominal. Entra-se respectivamente com 5200 [Volts] e 3210 [kVar].

ENTRE COM UM VALOR PARA UBCN SUPERIOR A: 5.1200089624E+03[Volts]:5200
ENTRE COM UM VALOR PARA QBCN SUPERIOR A: 3.1576628011E+06[VAR]:3210E3

MTFILTRO calcula os parâmetros do filtro nominal, monta o arquivo do MICROTRAN e efetua a simulação. Com os valores dos harmônicos de corrente obtidos do arquivo de saída do MICROTRAN, MTFILTRO calcula os valores de U_{teste} e Q_{teste} , que resultam:

UTESTE = 5.1336306130E+06 [Volts]
QTESTE = 3.1622461107E+03 [VAR]

VERIFICADO!!!!

O programa pergunta, a seguir, se é desejado corrigir o fator de potência para mais alguma barra. Neste caso, responde-se N (não).

DESEJA CORRIGIR O F.P. PARA MAIS ALGUMA BARRA? S/N (N)

MTFILTRO mostra agora, os fatores de distorção para o sistema após a correção do fator de potência. Nota-se que os fatores de distorção de tensão abaixam, apesar de não ter sido este o objetivo da instalação do filtro.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19
FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.28	0.80
3	0.00	0.44	1.14
4	0.00	0.21	0.81
5	0.00	2.45	9.93
6	0.00	0.51	1.88
7	0.00	2.27	8.01
8	0.00	0.79	2.74
9	0.00	0.79	2.72
10	0.00	0.94	3.20
11	0.00	2.70	9.17
12	0.00	1.00	3.40
13	0.00	1.45	4.90



14	0.00	1.23	4.14
15	0.00	1.14	3.85
16	0.00	1.23	4.16
17	0.00	1.88	6.33
18	0.00	1.21	4.09
19	0.00	0.42	1.42
Total	0.00	5.81	20.54

Pode-se continuar agora, instalando filtros para correção de harmônicos. Após a instalação destes (ver o caderno extra, para maiores detalhes), MTFILTRO apresenta os seguintes resultados:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE SIMULAÇÃO.

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.26	0.78
3	0.00	0.35	1.05
4	0.00	0.51	1.52
5	0.00	3.74	11.22
6	0.00	0.68	2.04
7	0.00	2.87	8.60
8	0.00	0.98	2.93
9	0.00	0.97	2.90
10	0.00	1.13	3.40
11	0.00	3.24	9.71
12	0.00	1.20	3.60
13	0.00	1.73	5.18
14	0.00	1.46	4.37
15	0.00	1.35	4.06
16	0.00	1.46	4.39
17	0.00	2.22	6.67
18	0.00	1.44	4.31
19	0.00	0.50	1.49
Total	0.00	7.39	22.16

SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 3 barras.
Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	FA	B8A	2A
2	0.00	0.28	0.80
3	0.00	0.46	1.16



4	0.00	0.20	0.82
5	0.00	1.00	8.48
6	0.00	0.46	1.82
7	0.00	2.13	7.87
8	0.00	0.77	2.73
9	0.00	0.83	2.76
10	0.00	1.23	3.50
11	0.00	0.91	7.39
12	0.00	0.74	3.13
13	0.00	1.16	4.61
14	0.00	1.02	3.94
15	0.00	0.97	3.68
16	0.00	1.06	3.98
17	0.00	1.63	6.08
18	0.00	1.06	3.93
19	0.00	0.37	1.37
Total	0.00	4.32	18.76

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO: 1

OBJETIVO : CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

BARRA = B8A

SINTONIA = 0.000000000E+00

UBCN = 5.200000000E+03 [Volts].

QBCN = 3.210000000E+06 [VAr].

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B8A

TIPO - AMORTECIDO.

ORDEM = 1.100000000E+01

UBCN = 7.620000000E+03 [Volts].

QBCN = 3.750000000E+05 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :3

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA - B8A

TIPO = AMORTECIDO.

ORDEM = 5.000000000E+00

UBCN = 6.360000000E+03 [Volts].

QBCN = 1.250000000E+06 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 1.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.

PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.





EXEMPLO 8

Para o exemplo 8 do capítulo III, MTFILTRO fornece os seguintes resultados:

SITUAÇÃO ANTES DA COLOCAÇÃO DOS FILTROS:

ARQUIVO RESULTANTE DE MEDIÇÃO.

Este sistema possui: 1 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B
2	0.00
3	0.21
4	0.12
5	0.71
6	0.00
7	0.48
8	0.00
9	0.57
10	0.00
11	8.58
12	0.34
13	6.44
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	1.16
18	0.00
19	2.69
Total 11.18	

----- SITUAÇÃO APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS:

Este sistema possui: 1 barras.

Análise feita até o harmônico número: 19

FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO (%):

n	B
2	0.00
3	0.29
4	0.03
5	0.43
6	0.00
7	0.41
8	0.00
9	0.81
10	0.00
11	1.21
12	0.12



13	2.98
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	0.68
18	0.00
19	1.62
Total	3.82

FILTROS INSTALADOS:

FILTRO NÚMERO: 1

OBJETIVO : CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

BARRA - B

SINTONIA = 4.100000000E+00

UBCN = 1.558850000E+04 [Volts].

QBCN = 7.200000000E+06 [VAr].

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

FILTRO NÚMERO :2

OBJETIVO : DIMINUIÇÃO DE HARMÔNICOS DE TENSÃO NO SISTEMA.

BARRA = B

TIPO = SINTONIZADO.

ORDEM = 1.100000000E+01

UBCN = 1.992000000E+04 [Volts].

QBCN = 1.900000000E+06 [VAr].

FATOR DE QUALIDADE = 3.000000000E+01

ZETA = 1.200000000E+00

CONEXÃO : ESTRELA ISOLADA.

NÃO HÁ NENHUM PROBLEMA COM RESSONÂNCIA.

PODE-SE RETIRAR OS FILTROS PARA MANUTENÇÃO, SEM PROBLEMAS.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES



CONCLUSÕES

A dissertação de mestrado apresentada teve por objetivo básico, a elaboração de um programa computacional que realizasse o mesmo procedimento mostrado no capítulo II para definir filtros para correção do fator de potência e/ou redução dos níveis de harmônicos de um sistema elétrico. Sendo assim, os capítulos foram apresentados numa ordem determinada para que se pudesse mostrar a utilização do programa elaborado.

No capítulo I, foram descritos os fatores que influenciam a qualidade da energia elétrica, dando ênfase ao fator que envolve harmônicos de tensão. Foram mostradas a série trigonométrica de Fourier, que é a ferramenta matemática básica utilizada, causas e conseqüências e uma modelagem para o estudo de harmônicos. Foi mostrada também, a análise do fator de potência com ou sem a presença de harmônicos.

Apresentaram-se no capítulo II, alguns aspectos envolvendo bancos de capacitores, metodologia para correção do fator de potência além de uma breve análise teórica dos filtros de harmônicos. Foram descritos os procedimentos, passo a passo, para a instalação de filtros para correção do fator de potência e diminuição dos níveis de harmônicos de um sistema elétrico. Estes procedimentos foram utilizados nos exemplos mostrados no capítulo III e na elaboração do programa.

No capítulo III, foram mostrados oito exemplos de instalação de filtros, sendo seis envolvendo filtros para diminuição dos níveis de harmônicos de um sistema elétrico e dois envolvendo correção do fator de potência. Estes exemplos foram bem distintos, objetivando compará-los com os resultados fornecidos pelo programa elaborado.

O capítulo IV descreve o programa elaborado, o qual foi denominado MTFILTRO. São descritos os objetivos do programa, os resultados obtidos, pré-requisitos de funcionamento e utilização do programa.

O capítulo V mostra os exemplos do capítulo III, utilizando o programa MTFILTRO. Constata-se que os resultados obtidos foram os mesmos.

Foram apresentados, propositadamente no exemplo 1 do capítulo III (e no caderno extra para os demais exemplos), todos os cálculos e tabelas utilizados na instalação de um filtro (apesar de não terem sido mostrados os intermináveis somatórios) com o objetivo de se mostrar a dificuldade que é a instalação de filtros.

O programa MTFILTRO elimina estas dificuldades, além de proporcionar uma grande flexibilidade para a escolha dos filtros, podendo-se assim alterar qualquer parâmetro de qualquer filtro, instalar outros filtros, retirar filtros e outros, com grande facilidade. Além disto, o programa apresenta, de acordo com os harmônicos por ele analisados, sugestões para a instalação de filtros, podendo ou não serem aceitas pelo usuário.

Sendo assim, o programa MTFILTRO se torna uma poderosa ferramenta ao engenheiro eletricitista para a instalação de filtros para correção do fator de potência e/ou filtros para diminuição dos níveis de harmônicos de um sistema elétrico, pois, além da grande economia de tempo e da grande flexibilidade, o programa oferece total segurança nos resultados fornecidos.

RECOMENDAÇÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Incorporar ao programa MTFILTRO uma rotina que realize uma análise econômica para uma melhor escolha dos filtros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FILHO, José Batista Siqueira, "Bancos de capacitores na presença de harmônicos", Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 1995
- [2] RINALDI, Roberto - Editora Érica - São Paulo - 1993
Turbo Pascal 7.0 - Comandos e Funções.
- [3] COGO, J. Roberto, "Correção do Fator de Potência" apostila do Curso de Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação, Itajubá, EFEI, 1995.
- [4] ELGERD, Olle. I., "Introdução a teoria de Sistemas de Energia Elétrica", tradução por Ademaro A. M. B. Cotrim - Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda - 1978.
- [5] MICROTRAN, MTLINE & FDDATA, Reference Manual, Microtran Power System Corporation, Vancouver, Canadian, September 1992.
- [6] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR-5282, Capacitores de Potência em Derivação Para Sistemas de Tensão Nominal Acima de 1000[V]", Maio, 1988.
- [7] IEEE - Institute of electrical and electronics Engineers, "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors", Revision of IEEE - Std 18-1992, Global Info Centures, New York, february, 1993.
- [8] IEEE - Institute of electrical and electronics Engineers, IEEE Std 1036-1992, "IEEE Guide For Application of Shunt Power Capacitors", Global Info Centures, New York, february, 1993.
- [9] INDUCON, "Capacitores Para Correção do Fator de Potência em Baixa Tensão, Catálogo BAC15-004, outubro, 1988.
- [10] INEPAR, "Capacitores de Potência", Catálogo UN. 2.17, Agosto, 1991.
- [11] POLITEL, "Manual de Instruções", Nº 001/BT91, São Paulo.
- [12] INDUCON, "Capacitores de Potência, Alta Tensão", Manual de Instruções, Catálogo AT-004A, Novembro, 1986.
- [13] COGO, J. R., Apostila da Disciplina de Cargas Elétrica Especiais, Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 1993.
- [14] IEEE - Institute of electrical and electronics Engineers, IEEE - Std-519, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", Global Info Centures, New York, february, 1992.



- [15] MAMEDE, J. F., Instalações Elétrica Industriais, "Correção do Fator de Potência", Editora Livros Técnicos e Científicos, 3ª Edição, Rio de Janeiro, 1988, pág. 109.
- [16] POLITEL, Equipamentos Elétricos LTDA, Manual, "Correção do Fator de Potência", POLE -03/08, São-Paulo.
- [17] DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Secretaria Nacional de Energia, Portaria Nº 85, Diário Oficial, Seção 1, 25 de Março de 1992, publicação 26 de Março de 1992.
- [18] DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Secretaria Nacional de Energia, Portaria Nº 613, Diário Oficial, Seção 1, 9 de Junho de 1993, publicação 14 de junho de 1993.
- [19] DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Secretaria Nacional de Energia Portaria Nº 1569, Diário Oficial, Seção 1, 23 de Dezembro de 1993, publicação 24 de Dezembro de 1993.
- [20] INDUCON, "Capacitores de Potência", 2ª Edição, Outubro, 1983.
- [21] ABM - Associação Brasileira de Metais, Seminário Anual de Fornos Elétricos, 28 a 31 de Maio, Rio de Janeiro, RJ, 1979.
- [22] HERMES, R. P.M. de oliveira, "Aplicações de compensadores estáticos em sistemas elétricos, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 1994.
- [23] MAURO, C., "Terceira Portaria, e o Novo Fator de Potência Já Vale em Abril", Revista Eletricidade Moderna, nº 239, Fevereiro, 1994.
- [24] Report of a Survey on the Connection of shunt capacitor Banks, AIEE Committ Report, AIEE transactions, 1959, pág. 1388-1393.
- [25] ROBERTO, L. R., "Bancos de Capacitores p/Compensação de Sistemas de Transmissão, Revista Mundo Elétrico, Fevereiro, 1978.
- [26] CLARK, N.R., Farnham, S.B., "Connection Arrangements e Protective practices for Shunt Capacitor Banks", AIEE Transactions, 1949, pág. 1226.
- [27] INEPAR, Catálogo, "Fusíveis para Proteção de Capacitores", Cat. IN.2.13, Janeiro, 1991.
- [28] BUTLER, J.W., "Analysis of Factors Which Influence the Application, Operation, and Design of Shunt-Capacitor Equipments Switched in Large Banks", AIEE Committee on Power Transmission and Distribution, Vol.59, 1940.
- [29] ALAIN, F.S. Levy, Manoel, C.M. Atallah, Albina, C. F., Eduardo, C., Luiz F. P.,



Olício, B.Jr., "Avaliação do Real Desempenho de Capacitores de Potência", Revista Eletricidade Moderna, Março, 1995. pág 52.

- [30] BARBOSA, M. A., Andrade, J.C., "Distorções Harmônicas: Uma Visão de Consumidor sobre os Critérios Recomendados pela Legislação Brasileira", 3º Erlac.Cigré, Foz do Iguaçu, 1989.
- [31] COGO, J. R., "Critérios para dimensionamento de filtros de harmônicos", Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- [32] EDSON, W., Richard, S., "Potência Ativa e Reativa Instantâneas em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas", COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, SBA-Control e Automação.
- [33] GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, Subcomitê de Estudos Elétricos (SCEL), Comissão de Estudos de Cargas Especiais (CECE), Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS), Comitê Técnico para Estudos dos Sistemas de Transmissão (CTST), Grupo de Trabalho para Estabelecimento de Critérios de Planejamento (GTCP), "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais", fevereiro, 1993.
- [34] ALVES, M. F., "Critérios para Especificação e Projeto de Filtros de Harmônicos", Revista Eletricidade Moderna, pág. 30, junho, 1994.
- [35] COGO, J. R., "Definição de filtros de Harmônicos para Correção do Fator de Potência", Revista Eletricidade Moderna, nº 255, Junho, 1995, pag. 110.
- [36] MILLER, ILR., "Operação de Sistemas de Potência", ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., tradução por Carlos P.S.B.Neto, McGraw-Hill - Rio de Janeiro, 1987.
- [37] CAMARGO, C.C.de B., "Confiabilidade aplicada a Sistemas de Potência", Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1981.

ANEXOS 1 A 18

**ARQUIVOS UTILIZADOS
NO CAPÍTULO III**

ANEXO 1

```
*
* . . . . . Case identification card
Archivo Casol.dat                      60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5                3
  B8A 2A      5.E-9 1.0                3
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ --- End of level 2: Switches and piecewise linear elements -----
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10  0.                -1.
14 2A-1 1.909E-02 300.  0.                -1.
14 2A-1 1.216E-02 420.  0.                -1.
14 2A-1 5.515E-03 660.  0.                -1.
14 2A-1 3.680E-03 780.  0.                -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0.                -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0.                -1.
$ --- End of level 3: Sources -----
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====
```

ANEXO 2

```
*
* . . . . . Case identification card
Archivo basico11.dat                    60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5                3
  B8A 2A      5.E-9 1.0                3
  B8A          0.908 5.4477563.3
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ --- End of level 2: Switches and piecewise linear elements -----
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10  0.                -1.
14 2A-1 1.909E-02 300.  0.                -1.
14 2A-1 1.216E-02 420.  0.                -1.
14 2A-1 5.515E-03 660.  0.                -1.
14 2A-1 3.680E-03 780.  0.                -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0.                -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0.                -1.
$ --- End of level 3: Sources -----
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====
```

ANEXO 3

```
*
* . . . . . Case identification card
Arquivo CASO1-1.DAT                      60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3 1.e-301 60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A 5.E-9 0.5 3
B8A 2A 5.E-9 1.0 3
B8A 1.139 6.8346029.1
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ --- End of level 2: Switches and piecewise linear elements -----
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0. -1.
14 2A-1 1.909E-02 300. 0. -1.
14 2A-1 1.216E-02 420. 0. -1.
14 2A-1 5.515E-03 660. 0. -1.
14 2A-1 3.680E-03 780. 0. -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0. -1.
$ --- End of level 3: Sources -----
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====
```

ANEXO 4

```
*
* . . . . . Case identification card
Arquivo basico12.dat                      60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3 1.e-301 60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A 5.E-9 0.5 3
B8A 2A 5.E-9 1.0 3
B8A 1.139 6.8346029.1
B8A 1.328 5.6933692.1
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0. -1.
14 2A-1 1.909E-02 300. 0. -1.
14 2A-1 1.216E-02 420. 0. -1.
14 2A-1 5.515E-03 660. 0. -1.
14 2A-1 3.680E-03 780. 0. -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0. -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====
```

ANEXO 5

```
*
* . . . . . Case identification card
Arquivo Casol-2.dat                      60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5                3
  B8A 2A      5.E-9 1.0                3
  B8A          1.139 6.8346029.1
  B8A          1.592 6.8243080.5
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10  0.             -1.
14 2A-1 1.909E-02 300.  0.             -1.
14 2A-1 1.216E-02 420.  0.             -1.
14 2A-1 5.515E-03 660.  0.             -1.
14 2A-1 3.680E-03 780.  0.             -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0.             -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0.             -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====
```

ANEXO 6

```
*
* . . . . . Case identification card
Arquivo basico13.dat                     60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5                3
  B8A 2A      5.E-9 1.0                3
  B8A          1.139 6.8346029.1
  B8A          1.592 6.8243080.5
  B8A          2.470 6.7371263.5
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ --- End of level 2: Switches and piecewise linear elements -----
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10  0.             -1.
14 2A-1 1.909E-02 300.  0.             -1.
14 2A-1 1.216E-02 420.  0.             -1.
14 2A-1 5.515E-03 660.  0.             -1.
14 2A-1 3.680E-03 780.  0.             -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0.             -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0.             -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
```

\$ === Level 5: End of data case =====

ANEXO 7

```
* . . . . . Case identification card
Arquivo Casol-3.dat                60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5                3
  B8A 2A      5.E-9 1.0                3
  B8A          1.139 6.8346029.1
  B8A          1.592 6.8243080.5
  B8A          2.814 7.6761109.0
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10  0.             -1.
14 2A-1 1.909E-02 300.  0.            -1.
14 2A-1 1.216E-02 420.  0.            -1.
14 2A-1 5.515E-03 660.  0.            -1.
14 2A-1 3.680E-03 780.  0.            -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0.           -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0.           -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ --- Level 5: End of data case -----
```

ANEXO 8

```
*
* . . . . . Case identification card
Arquivo caso1-4.dat                60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5                3
  B8A 2A      5.E-9 1.0                3
  B8A          1.224 7.3435610.8
  B8A          1.695 7.2642893.9
  B8A          3.040 8.2901026.8
$ -- End of level 1: Linear and nonlinear elements -----
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10  0.             -1.
14 2A-1 1.909E-02 300.  0.            -1.
14 2A-1 1.216E-02 420.  0.            -1.
14 2A-1 5.515E-03 660.  0.            -1.
14 2A-1 3.680E-03 780.  0.            -1.
```

```

14 2A-1 1.697E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0. -1.
$=== End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$=== Level 5: End of data case =====

```

ANEXO 9

```

* . . . . . Case identification card
Archivo caso1-5.dat 60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3 1.e-301 60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A 5.E-9 0.5 3
B8A 2A 5.E-9 1.0 3
B8A 1.695 7.2642893.9
B8A 3.040 8.2901026.8
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$=== End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0. -1.
14 2A-1 1.909E-02 300. 0. -1.
14 2A-1 1.216E-02 420. 0. -1.
14 2A-1 5.515E-03 660. 0. -1.
14 2A-1 3.680E-03 780. 0. -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0. -1.
$=== End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$--- Level 5: End of data case -----

```

ANEXO 10

```

*
* . . . . . Case identification card
Archivo caso1-6.dat 60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3 1.e-301 60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A 5.E-9 0.5 3
B8A 2A 5.E-9 1.0 3
B8A 1.224 7.3435610.8
B8A 3.040 8.2901026.8
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$=== End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0. -1.

```

```

14 2A-1 1.909E-02 300. 0. -1.
14 2A-1 1.216E-02 420. 0. -1.
14 2A-1 5.515E-03 660. 0. -1.
14 2A-1 3.680E-03 780. 0. -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0. -1.
$=== End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$=== Level 5: End of data case =====

```

ANEXO 11

```

*
* . . . . . Case identification card
Arquivo caso1-7.dat 60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3 1.e-301 60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A 5.E-9 0.5 3
B8A 2A 5.E-9 1.0 3
B8A 1.224 7.3435610.8
B8A 1.695 7.2642893.9
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0. -1.
14 2A-1 1.909E-02 300. 0. -1.
14 2A-1 1.216E-02 420. 0. -1.
14 2A-1 5.515E-03 660. 0. -1.
14 2A-1 3.680E-03 780. 0. -1.
14 2A-1 1.697E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 1.273E-03 1140. 0. -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====

```

ANEXO 12

```

ARQUIVO PONTE1.DAT
50.-6 50.-3 1 10.-30
FA B8A .5E-93.06-3 3
FB B8B FA B8A 3
FC B8C FA B8A 3
PP PPD 0.0 100. 0.0 3
B8A 2A .5E-96.11-3 3
B8B 2B B8A 2A 3
B8C 2C B8A 2A 3
PN PND 0.0 100.0 0.0 3
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
-1 2A PP 60. 0.00166 0.0 60.
-1 2B PP 180. 0.00166 0.0 60.

```

```

-1 2C PP -1.          300. 0.00166 0.0 60.
-1 PN 2A          240. 0.00166 0.0 60.
-1 PN 2B -1.       360. 0.00166 0.0 60.
-1 PN 2C          120. 0.00166 0.0 60.
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
14 PPD-1 -11600. 0.000001 0.0          -1.
14 PND-1 11600. 0.000001 0.0          -1.
14 FA 1 401.14 60. -90.          -1.
14 FB 1 401.14 60. 150.          -1.
14 FC 1 401.14 60. 30.          -1.
$ === End of level 3: Sources =====
FA FB FC 2A 2B 2C
1 **** All voltages will be printed ****
$ === End of level 4: User-defined voltage output =====
$ === Level 5: End of data case =====

```

ANEXO 13

***** Fourier Analysis Program *****

(c) Copyright The University of British Columbia, 1985
(c) Copyright MicroTran Power System Analysis Corporation 1985-1993

Written by H. W. Dommel and L. Marti

Case ID: From user's instructions
PONTE1.DAT - PONTE RETIFICADORA

Data file: PONTE1.PLO
Output file: PONTE1.SAI
Parameter file: RILDO.PAR

Record of ordinates in 333 equidistant points
Period (rounded to nearest integer of Deltat)= 1.6650000E-02 seconds.
Analysis starts at 0.0000000E+00 seconds, fundamental frequency is 6.0060062E+01 Hz

Data read from an MT plot file is variable no. 26
which corresponds to branch current between B8A and 2A

FOURIER COEFFICIENTS

HARMONIC	COS-COEFF.	SIN-COEFF.	MAGNITUDE	ANGLE(DEG)	MULTIPLE OF FUNDAMENTAL FRMS
0	2.061930E+02	0.000000E+00	2.061930E+02	0.000000	0.016422 2.061930E+02
1	-7.107488E+03	1.035016E+04	1.255556E+04	-124.477514	1.000000 8.880518E+03
2	4.519366E+02	3.405746E+01	4.532180E+02	-4.309604	0.036097 8.886298E+03
3	3.992022E+02	7.254266E+01	4.057398E+02	-10.299351	0.032316 8.890929E+03
4	4.218758E+02	1.331957E+02	4.424028E+02	-17.522084	0.035236 8.896430E+03
5	3.680356E+02	2.579706E+03	2.605827E+03	-81.880647	0.207544 9.085243E+03
6	3.699406E+02	1.398140E+02	3.954795E+02	-20.703406	0.031498 9.089546E+03
7	-1.261326E+03	6.673791E+02	1.427003E+03	-152.116270	0.113655 9.145382E+03
8	3.818945E+02	1.866146E+02	4.250510E+02	-26.042670	0.033854 9.150319E+03
9	3.216272E+02	1.900108E+02	3.735614E+02	-30.573733	0.029753 9.154131E+03
10	3.075834E+02	2.470935E+02	3.945412E+02	-38.776249	0.031424 9.158381E+03
11	-2.936639E+02	9.815613E+02	1.024549E+03	-106.656153	0.081601 9.186991E+03
12	2.637938E+02	2.265635E+02	3.477329E+02	-40.658152	0.027696 9.190281E+03

13	-4.617411E+02	-1.725710E+01	4.620634E+02	177.859626	0.036801	9.196087E+03
14	2.475096E+02	2.647048E+02	3.623943E+02	-46.922721	0.028863	9.199656E+03
15	2.035041E+02	2.399027E+02	3.145905E+02	-49.692800	0.025056	9.202345E+03
16	1.668631E+02	2.709005E+02	3.181673E+02	-58.368712	0.025341	9.205095E+03
17	-2.786603E+02	3.604345E+02	4.555926E+02	-127.708442	0.036286	9.210730E+03
18	1.442622E+02	2.373596E+02	2.777610E+02	-58.709641	0.022123	9.212824E+03
19	-6.088995E+01	-6.801859E+01	9.129137E+01	131.834769	0.007271	9.213050E+03
20	1.145136E+02	2.512374E+02	2.761043E+02	-65.496568	0.021991	9.215119E+03
21	9.691388E+01	2.187848E+02	2.392887E+02	-66.108365	0.019058	9.216672E+03
22	6.314478E+01	2.195360E+02	2.284367E+02	-73.953267	0.018194	9.218087E+03
23	-1.070226E+02	1.164966E+02	1.581938E+02	-132.572944	0.012600	9.218766E+03
24	5.987042E+01	1.898897E+02	1.991044E+02	-72.500433	0.015858	9.219841E+03
25	7.691777E+01	4.493912E+01	8.908349E+01	-30.295560	0.007095	9.220056E+03

TOTAL HARMONIC DISTORTION TO 25TH HARMONIC = 27.9235 PERCENT

ANEXO 14

```

*
* . . . . . Case identification card
Arquivo caso2.dal                      60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A      5.E-9 0.5                      3
B8A 2A      5.E-9 1.0                      3
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ --- End of level 2: Switches and piecewise linear elements -----
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0. -1.
14 2A-1 1.714E-03 0. 0. -1.
14 2A-1 3.768E-03 120. 0. -1.
14 2A-1 3.373E-03 180. 0. -1.
14 2A-1 3.678E-03 240. 0. -1.
14 2A-1 2.166E-02 300. 0. -1.
14 2A-1 3.288E-03 360. 0. -1.
14 2A-1 1.186E-02 420. 0. -1.
14 2A-1 3.534E-03 480. 0. -1.
14 2A-1 3.106E-03 540. 0. -1.
14 2A-1 3.280E-03 600. 0. -1.
14 2A-1 8.518E-03 660. 0. -1.
14 2A-1 2.891E-03 720. 0. -1.
14 2A-1 3.842E-03 780. 0. -1.
14 2A-1 3.013E-03 840. 0. -1.
14 2A-1 2.615E-03 900. 0. -1.
14 2A-1 2.645E-03 960. 0. -1.
14 2A-1 3.788E-03 1020. 0. -1.
14 2A-1 2.309E-03 1080. 0. -1.
14 2A-1 7.590E-04 1140. 0. -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====

```

ANEXO 15

```
* . . . . . Case identification card
PONTE COM TRANSFORMADOR Y Y                60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.E-6 50.E-3      1.E-301
*
* . . . . . Lumped RLC branch
FA B8A      1.E-9.08653                3
FB B8B FA B8A                3
FC B8C FA B8A                3
PP PPD      75.398                3
PP PN      1.E10                3
2A 3A      1.E-12                3
*
* . . . . . Three single-phase transformer units (simplified)
* (saved into file C:\RILDO\PASCAL\RILDO.TRF)
51 B8A INVERSE 0.1081599987E-03 0.5778476403E+01
52 2A      0.0000000000E+00-0.5008012868E+02
          0.1439999990E-05 0.4340277807E+03
51 B8B INVERSE 0.1081599987E-03 0.5778476403E+01
52 2B      0.0000000000E+00-0.5008012868E+02
          0.1439999990E-05 0.4340277807E+03
51 B8C INVERSE 0.1081599987E-03 0.5778476403E+01
52 2C      0.0000000000E+00-0.5008012868E+02
          0.1439999990E-05 0.4340277807E+03
$ --- End of level 1: Linear and nonlinear elements -----
*
* . . . . . Thyristor and Diode switch
-1 3A PP      60. .00166 0.0 60.
-1 2B PP      180. .00166 0.0 60.
-1 2C PP  -1.  300. .00166 0.0 60.
-1 PN 3A      240. .00166 0.0 60.
-1 PN 2B  -1.  360. .00166 0.0 60.
-1 PN 2C      120. .00166 0.0 60.
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 PPD-1 -11600 .000001 0.0          -1.
14 PN -1  11600 .000001 0.0          -1.
14 FA+1  3475. 60. -90.             -1.
14 FB+1  3475. 60. 150.             -1.
14 FC+1  3475. 60. 30.              -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====
```

ANEXO 16

```
*
* . . . . . Case identification card
Archivo caso3.dat                60. 60.
*
* . . . . . Time card
50.e-6 50.e-3      1.e-301  60. -60. 1200.
```

```

*
* . . . . . Lumped RLC branch
  FA B8A      5.E-9 0.5          3
  B8A 2A      5.E-9 1.0          3
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ --- End of level 2: Switches and piecewise linear elements -----
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 FA+1 1.E-10 1.E-10 0.         -1.
14 2A-1 1.714E-03 0. 0.         -1.
14 2A-1 3.768E-03 120. 0.        -1.
14 2A-1 3.373E-03 180. 0.        -1.
14 2A-1 3.678E-03 240. 0.        -1.
14 2A-1 2.166E-02 300. 0.        -1.
14 2A-1 3.288E-03 360. 0.        -1.
14 2A-1 1.186E-02 420. 0.        -1.
14 2A-1 3.534E-03 480. 0.        -1.
14 2A-1 3.106E-03 540. 0.        -1.
14 2A-1 3.280E-03 600. 0.        -1.
14 2A-1 8.518E-03 660. 0.        -1.
14 2A-1 2.891E-03 720. 0.        -1.
14 2A-1 3.842E-03 780. 0.        -1.
14 2A-1 3.013E-03 840. 0.        -1.
14 2A-1 2.615E-03 900. 0.        -1.
14 2A-1 2.645E-03 960. 0.        -1.
14 2A-1 3.788E-03 1020. 0.       -1.
14 2A-1 2.309E-03 1080. 0.       -1.
14 2A-1 7.590E-04 1140. 0.       -1.
$ === End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
$ === Level 5: End of data case =====

```

ANEXO 17

```

* . . . . . Case identification card
Arquivo caso4.dat
*
* . . . . . Time card
50.E-6 50.E-3 1.E-301 60. -60. 1500.
*
* . . . . . Lumped RLC branch
  B10      .052223.7274          3
  B10 B20  .007859.62-3          3
  B20 B300 .608110.338          3
  B20 B200 .557710.308          3
  B10 B100 2.23121.528          3
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
14 B100-1 3.718E-5 120. 0.         -1.
14 B100-1 1.353E-4 180. 0.         -1.
14 B100-1 2.913E-4 240. 0.         -1.
14 B100-1 1.428E-4 300. 0.         -1.

```

14	B100-1	8.839E-5	360.	0.	-1.
14	B100-1	1.180E-4	420.	0.	-1.
14	B100-1	3.610E-5	480.	0.	-1.
14	B100-1	4.311E-5	540.	0.	-1.
14	B100-1	2.587E-5	600.	0.	-1.
14	B100-1	5.820E-5	660.	0.	-1.
14	B100-1	2.802E-5	720.	0.	-1.
14	B100-1	3.880E-5	780.	0.	-1.
14	B100-1	2.479E-5	840.	0.	-1.
14	B100-1	2.641E-5	900.	0.	-1.
14	B100-1	2.209E-5	960.	0.	-1.
14	B100-1	2.317E-5	1020.	0.	-1.
14	B100-1	2.533E-5	1080.	0.	-1.
14	B100-1	2.802E-5	1140.	0.	-1.
14	B100-1	2.048E-5	1200.	0.	-1.
14	B100-1	2.479E-5	1260.	0.	-1.
14	B100-1	1.940E-5	1320.	0.	-1.
14	B100-1	2.533E-5	1380.	0.	-1.
14	B100-1	2.209E-5	1440.	0.	-1.
14	B100-1	2.748E-5	1500.	0.	-1.
14	B200-1	2.345E-3	120.	0.	-1.
14	B200-1	2.371E-3	180.	0.	-1.
14	B200-1	9.075E-4	240.	0.	-1.
14	B200-1	1.042E-3	300.	0.	-1.
14	B200-1	3.158E-4	360.	0.	-1.
14	B200-1	5.755E-4	420.	0.	-1.
14	B200-1	4.408E-4	480.	0.	-1.
14	B200-1	3.050E-4	540.	0.	-1.
14	B200-1	2.037E-4	600.	0.	-1.
14	B200-1	3.932E-4	660.	0.	-1.
14	B200-1	2.274E-4	720.	0.	-1.
14	B200-1	2.317E-4	780.	0.	-1.
14	B200-1	1.509E-4	840.	0.	-1.
14	B200-1	1.832E-4	900.	0.	-1.
14	B200-1	1.821E-4	960.	0.	-1.
14	B200-1	2.080E-4	1020.	0.	-1.
14	B200-1	1.401E-4	1080.	0.	-1.
14	B200-1	1.283E-4	1140.	0.	-1.
14	B200-1	1.283E-4	1200.	0.	-1.
14	B200-1	1.455E-4	1260.	0.	-1.
14	B200-1	1.186E-4	1320.	0.	-1.
14	B200-1	1.660E-4	1380.	0.	-1.
14	B200-1	1.132E-4	1440.	0.	-1.
14	B200-1	1.326E-4	1500.	0.	-1.
14	B300-1	3.664E-4	120.	0.	-1.
14	B300-1	4.031E-4	180.	0.	-1.
14	B300-1	1.875E-4	240.	0.	-1.
14	B300-1	3.557E-4	300.	0.	-1.
14	B300-1	1.099E-4	360.	0.	-1.
14	B300-1	2.069E-4	420.	0.	-1.
14	B300-1	1.110E-4	480.	0.	-1.
14	B300-1	1.142E-4	540.	0.	-1.
14	B300-1	8.946E-5	600.	0.	-1.
14	B300-1	1.929E-4	660.	0.	-1.
14	B300-1	8.730E-5	720.	0.	-1.
14	B300-1	2.403E-4	780.	0.	-1.

14	B300-1	1.024E-4	840.	0.	-1.
14	B300-1	1.304E-4	900.	0.	-1.
14	B300-1	1.056E-4	960.	0.	-1.
14	B300-1	1.412E-4	1020.	0.	-1.
14	B300-1	9.808E-5	1080.	0.	-1.
14	B300-1	7.221E-5	1140.	0.	-1.
14	B300-1	6.251E-5	1200.	0.	-1.
14	B300-1	1.347E-4	1260.	0.	-1.
14	B300-1	8.837E-5	1320.	0.	-1.
14	B300-1	7.976E-5	1380.	0.	-1.
14	B300-1	7.760E-5	1440.	0.	-1.
14	B300-1	8.514E-5	1500.	0.	-1.

\$=== End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
\$=== Level 5: End of data case =====

ANEXO 18

* Case identification card
Arquivo caso6.dat
*
* Time card
50.E-6 50.E-3 1.E-301 60. -60. 1200.
*
* Lumped RLC branch
B .67739 3
\$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
\$=== End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* Voltage or current sources
14 B-1 3.7859E-3 180. -90. -1.
14 B-11.69015E-3 240. -90. -1.
14 B-17.84229E-3 300. -90. -1.
14 B-13.78593E-3 420. -90. -1.
14 B-13.52903E-3 540. -90. -1.
14 B-143.2002E-3 660. -90. -1.
14 B-11.56846E-3 720. -90. -1.
14 B-1 2.7448E-2 780. -90. -1.
14 B-13.78593E-3 1020. -90. -1.
14 B-17.84229E-3 1140. -90. -1.
\$=== End of level 3: Sources =====
1 **** All voltages will be printed ****
\$=== Level 5: End of data case =====