

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Uma Contribuição ao Estudo de Sobretensões em
Sistemas Elétricos de Pequeno Porte
Contendo Cargas Não - Lineares**

Karina Matilde Laurido Solórzano

Itajubá, Julho de 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE
SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
PEQUENO PORTE CONTENDO CARGAS NÃO -
LINEARES**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Por:

Karina Matilde Laurido Solórzano

Orientadores: Prof. Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu
Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá

Itajubá, Julho de 2004

*A meus pais, Marcos Enrique Laurido Arce
e Clara Solórzano de Laurido.*

Agradecimentos

A Deus, sem sua luz divina não poderia ter chegado até onde estou.

A meus pais, Marcos e Clara, que sempre me apoiaram em todos os meus projetos.

A Roberto Miranda Ruiz, por estar a meu lado e dar-me sempre a maior força.

Ao Professor Dr. José Policarpo Gonçalves de Abreu, por ter acreditado em mim e ter-me dado a oportunidade de realizar meu sonho.

Aos Professores Dr. Jocélio Souza de Sá e Dr. Luiz Francisco Pontin, pelo conhecimento transmitido, a paciência e ânimo, e pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal de Itajubá, pela preparação acadêmica ao longo deste período de estudo.

RESUMO

A terceirização do parque industrial brasileiro tem como consequência o aparecimento de empresas de pequeno porte alimentadas em média tensão. Estas empresas, geralmente, possuem cargas não - lineares, principalmente conversores de corrente alternada em corrente contínua. O baixo fator de potência daí resultante, leva a necessidade de instalação de bancos de capacitores, que podem provocar sobretensões na rede de alimentação.

Este trabalho analisa esta situação tomando como base uma forjaria, na qual detectou-se, através de medições, tanto o baixo fator de potência quanto a presença de harmônicos de corrente.

É apresentado o cálculo do banco de capacitores para correção do fator de potência e feita a análise da ocorrência de sobretensões em função da localização do banco. Para o cálculo das sobretensões foi desenvolvido um método no qual o sistema é representado pelo seu circuito elétrico equivalente. A partir deste circuito são determinadas as equações diferenciais que representam o comportamento do mesmo no domínio do tempo. A solução particular deste sistema de equações fornece o valor das tensões nas diversas barras do sistema em regime permanente.

ABSTRACT

Outsourcing of Brazilian industrial park has resulted in the proliferation of small size companies fed in medium voltage levels. These companies have generally non-linear loads, especially alternate current to direct current converters. Low power factor resulting of this leads to the need of installing capacitors which could inversely produce over-voltages in the electric network.

This work analyzes a case taken at an industry, in which was found through several measuring the low power factor as well as the current harmonics.

It is shown the calculation of the capacitors rating for improvement of the power factor and the analysis of overvoltages resulting from capacitor location. For the calculation of overvoltages a method has been developed, in which the system is represented by its equivalent circuit. Using this circuit, differential equations has been established and is represented its behavior in time domain. The particular solution for this equation system yields the value of voltage for every system busbar at steady state.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
CAPÍTULO 2 - VISÃO GERAL SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ...	4
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	4
2.2 – O CRESCENTE INTERESSE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	4
2.3 – PRINCIPAIS DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	6
2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	8
CAPÍTULO 3 - POSTULAÇÃO AO PROBLEMA	9
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
3.2 - MEDIÇÕES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE.....	11
3.3 - DADOS REFERENTES ÀS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA, FORNECIDOS PELA CONCESSIONÁRIA.....	15
3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
CAPÍTULO 4 - CÁLCULO DA POTÊNCIA DOS BANCOS DE CAPACITORES	17
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
4.2 - FATOR DE POTÊNCIA DO CONVERSOR.....	17
4.3 - FATOR DE POTÊNCIA DA INSTALAÇÃO	22
4.4 - CÁLCULO DA POTÊNCIA DOS BANCOS DE CAPACITORES.....	23
4.5 - LOCALIZAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES.....	23
4.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA O CÁLCULO DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES PROVOCADO PELA INSTALAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES.....	31
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	31
5.2 - CASO I: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE ALTA TENSÃO 13,8 KV.....	32
5.3 - CASO II: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO 627V	35
5.4 - CASO III: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE ALTA TENSÃO, 13.8 KV E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE.	39
5.5 - CASO IV: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO, 627 V E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE.	44
5.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	49
6.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	49
6.2 - CASOS I: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE ALTA TENSÃO 13,8 KV.....	51
6.3 - CASO II: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO 627 V.....	56
6.4 - CASO III: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE ALTA TENSÃO, 13,8 KV E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE.	61
6.5 - CASO IV: BANCO DE CAPACITORES CONECTADO NO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO, 627V E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	68
6.6 - CASO V: BANCO DE CAPACITORES E INDUTOR EM SÉRIE CONECTADO NO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO, 627 V E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	75
6.7 - DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA	81
6.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	86
ANEXO A.....	87

Lista de Figuras

FIGURA 2.1- PRINCIPAIS DISTÚRBIOS ASSOCIADOS A QEE	7
FIGURA 3.1 - FORNO DE INDUÇÃO	9
FIGURA 3.2 - MEDIÇÃO DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE	12
FIGURA 3.3 - (A) FORMAS DE ONDA DAS TENSÕES DE LINHA NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR; (B) TENSÃO NO LADO DE CORRENTE CONTÍNUA DO CONVERSOR.....	13
FIGURA 3.4 - (A) FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES NO LADO DE CORRENTE CONTÍNUA DO CONVERSOR; (B). FORMAS DE ONDA DA CORRENTE NA FASE A DO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR.....	14
FIGURA 4.1 - CONVERSOR DO FORNO DE INDUÇÃO	18
FIGURA 4.2 - CORRENTE NA SAÍDA DO CONVERSOR.....	18
FIGURA 4.3 - BANCO DE CAPACITORES NO BARRAMENTO DE 13,8 KV.....	24
FIGURA 4.4 - INSTALAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES EM ESTRELA DUPLA	25
FIGURA 4.5 - BANCO DE CAPACITORES NO BARRAMENTO DE 627 V.....	26
FIGURA 4.6 - BANCO DE CAPACITORES NO BARRAMENTO DE 13.8 KV E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	28
FIGURA 4.7 - BANCO DE CAPACITORES NO BARRAMENTO DE 627 V E NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	29
FIGURA 5.1 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO I.....	32
FIGURA 5.2 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO I.....	33
FIGURA 5.3 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO II	36
FIGURA 5.4 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO II	36
FIGURA 5.5 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO III.....	39
FIGURA 5.6 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO III.....	40
FIGURA 5.7 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO IV	44
FIGURA 5.8 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO IV	44
FIGURA 6.1 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO I.....	51
FIGURA 6.2 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO I.....	53
FIGURA 6.3 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO II	56
FIGURA 6.4 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO II	58
FIGURA 6.5 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO III.....	61
FIGURA 6.6 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO III.....	63
FIGURA 6.7 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO IV	68
FIGURA 6.8 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO IV	70
FIGURA 6.9 - DIAGRAMA UNIFILAR CASO V.....	75
FIGURA 6.10 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO CASO V	77
FIGURA 6.11 - CIRCUITO DAS IMPEDÂNCIAS	82
FIGURA 6.12 - GRÁFICO DAS IMPEDÂNCIAS.....	83
FIGURA A.1 - DIAGRAMA UNIFILAR DA INDÚSTRIA.....	87

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS DISTÚRBIOS DA QEE.....	8
TABELA 3.1 - RESULTADO DAS MEDIÇÕES DOS HARMÔNICOS DE CORRENTE	15
TABELA 3.2 - MEDIÇÕES DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA REALIZADAS PELA CONCESSIONÁRIA.....	15
TABELA 4.1 - POTÊNCIA NOMINAL DOS BANCOS DE CAPACITORES.....	27
TABELA 6.1 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO I.....	55
TABELA 6.2 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO II.....	60
TABELA 6.3 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO III NO BARRAMENTO DE 13800 V	67
TABELA 6.4 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO III NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	67
TABELA 6.5 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO IV NO BARRAMENTO DO CONVERTOR	74
TABELA 6.6 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO IV NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	74
TABELA 6.7 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO V NO BARRAMENTO DO CONVERTOR	80
TABELA 6.8 - SOBRETENSÃO HARMÔNICA CASO V NO BARRAMENTO DO MOTOR EQUIVALENTE	81

Simbologia

$F.P.$	Fator de Potência
Fd	Fator de distorção
α	Ângulo de disparo do retificador
S	Potência aparente
S_{cc}	Potência aparente de curto circuito
S_{TN}	Potência aparente do transformador
S_{corr}	Potência aparente corrigida
P	Potência ativa
P_d	Potência ativa do conversor
P_N	Potência nominal
P_R	Potência ativa dissipada na resistência
Q	Potência reativa
Q_{corr}	Potência reativa corrigida
Q_{BC}	Potência reativa do banco de capacitores
$Q_{BC(nova)}$	Potência reativa do banco de capacitores (nova)
$Q_{BC(M)}$	Potência reativa do banco de capacitores instalada em paralelo com o motor equivalente
U_{daN}	Valor eficaz da Tensão na entrada do conversor
U_2	Valor eficaz da Tensão na entrada do conversor
U_N	Valor eficaz da tensão nominal da rede
U_{1N}	Valor eficaz da Tensão nominal do primário do transformador
U_{2N}	Valor eficaz da Tensão nominal do secundário do transformador
U_{BCn}	Valor eficaz da Tensão nominal do banco de capacitores

U	Valor eficaz da Tensão da rede
$U_{BC1(ef)}$	Valor eficaz da Tensão no banco de capacitores 1
$U_{BC2(ef)}$	Valor eficaz da Tensão no banco de capacitores 2
u	Valor instantâneo da Tensão da rede
u_{BC1}	Valor instantâneo da Tensão do banco de capacitores 1
u_{BC2}	Valor instantâneo da Tensão do banco de capacitores 2
I_N	Valor eficaz da Corrente nominal da rede
I_2	Valor eficaz da Corrente na entrada do conversor
I_d	Valor médio da Corrente na saída do conversor
$I_{d(ef)}$	Valor eficaz da Corrente na saída do conversor
i_{conv}	Valor instantâneo da Corrente na entrada do conversor
i_{rede}	Valor instantâneo da Corrente da rede
i_{T1}	Valor instantâneo da Corrente do transformador 1
i_{T2}	Valor instantâneo da Corrente do transformador 2
i_M	Valor instantâneo da Corrente no motor equivalente
i_{BC1}	Valor instantâneo da Corrente no banco de capacitores 1
i_{BC2}	Valor instantâneo da Corrente no banco de capacitores 2
$Z\%$	Impedância porcentual
Z_{rede}	Impedância da rede
Z_{T1}	Impedância do transformador 1
Z_{T2}	Impedância do transformador 2
Z_M	Impedância do motor equivalente
Z_{BC1}	Impedância do banco de capacitores 1
Z_{BC2}	Impedância do banco de capacitores 2
R	Resistência da carga

$R\%$	Resistência porcentual
R_{rede}	Resistência da rede
R_{T1}	Resistência do transformador 1
R_{T2}	Resistência do transformador 2
R_M	Resistência do motor equivalente
R_h	Resistência devido ao efeito pelicular
X_{rede}	Reatância da rede
X_{T1}	Reatância do transformador 1
X_{T2}	Reatância do transformador 2
X_M	Reatância do motor equivalente
X_{BC1}	Reatância do banco de capacitores 1
X_{BC2}	Reatância do banco de capacitores 2
X_{LBC}	Reatância do indutor no banco de capacitores 1
L_{rede}	Indutância da rede
L_{T2}	Indutância do transformador 2
L_{T1}	Indutância do transformador 1
L_M	Indutância do motor equivalente
L_{BC1}	Indutância do banco de capacitores 1
C_{BC1}	Capacitância do banco de capacitores 1
C_{BC2}	Capacitância do banco de capacitores 2
ω	Frequência natural
h	Ordem harmônica

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais e Motivação

A terceirização de serviços na indústria tem tido como consequência a instalação de empresas de médio ou pequeno porte, geralmente alimentadas em média tensão. Estas indústrias usualmente contêm cargas não lineares, conversores de corrente alternada em corrente contínua, que reduzem o fator de potência e distorcem a forma de onda de corrente da rede elétrica.

Isto significa que, estudos para correção do fator de potência devem, além de definir as características dos bancos de capacitores, analisar a possibilidade da ocorrência de sobretensões devido ao fenômeno de ressonância, provocado pela forma de onda não senoidal da corrente associada à baixa potência de curto-circuito da rede de suprimento de energia elétrica.

Neste trabalho propõe-se analisar o efeito da instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência nestas instalações, no que se refere à ocorrência de ressonância acompanhada de sobretensões.

A metodologia proposta difere da usual, que analisa este efeito a partir de um circuito elétrico equivalente, que permite a determinação da impedância do sistema em função da frequência, do ponto de vista do conversor, ou seja, verificando a ocorrência de ressonância paralela.

Por outro lado, neste trabalho, o circuito elétrico equivalente permite a determinação da distorção na tensão da rede de suprimento de energia elétrica no ponto de alimentação da indústria, provocada pelos harmônicos de corrente produzidos por cargas não - lineares. Em seguida, verifica-se o comportamento do circuito com a instalação de bancos de capacitores nos diversos pontos. A vantagem deste método é permitir a determinação da tensão em qualquer ponto do sistema.

A metodologia utilizada será apresentada nos capítulos seguintes através de um caso real de uma indústria de pequeno porte, na qual o baixo fator de potência resulta da operação de um retificador controlado alimentando um forno de indução. Desta forma, a abordagem do assunto será feita conforme descrito a seguir:

1.2 - Estrutura da Dissertação

A estrutura desta dissertação foi dividida em capítulos conforme a descrição a seguir:

Capítulo 2 - Neste capítulo, será apresentados os conceitos gerais e as definições básicas sobre qualidade da energia elétrica, também serão apresentados os principais distúrbios vinculados à qualidade, tais como: transitórios, variações de tensão de curta e longa duração, desequilíbrios, distorção da forma de onda, flutuações de tensão e variações de frequência.

Capítulo 3 - Serão apresentados os resultados das medições dos harmônicos de corrente as potências ativas, reativas e aparentes presentes no sistema, que permitiram a determinação do fator de potência atual. O diagrama unifilar da indústria e os pontos onde foram realizadas as medições estão no anexo A.

Capítulo 4 - Será apresentado o cálculo da potência do banco de capacitores para correção do fator de potência, serão também apresentadas as diversas alternativas para localização dos bancos de capacitores.

Capítulo 5 - Neste capítulo, será apresentada a metodologia desenvolvida que permitirá a determinação das sobretensões harmônicas em função da localização dos bancos de capacitores. Esta metodologia contém, para cada caso analisado, a determinação do circuito elétrico equivalente, das equações diferenciais que apresentam o comportamento do mesmo e as respectivas soluções que permitem o cálculo das tensões nas diversas barras do sistema.

Capítulo 6 - Para cada caso equacionado no capítulo 4 são determinadas as tensões nas diversas barras do sistema. São usados os dados dos bancos da planta elétrica cujo diagrama unifilar está no anexo A e os dados dos bancos de capacitores calculados no capítulo 3.

Este capítulo, através de dois casos adicionais validará o método desenvolvido. Um caso analisa a ligação de um indutor em série com o banco de capacitores para uma das configurações apresentadas. O outro caso determina o comportamento da impedância harmônica do sistema para mesma configuração comprovando a ocorrência da sobretensão.

Capítulo 7 – São apresentadas as conclusões obtidas do trabalho desenvolvido assim como também algumas sugestões para próximos trabalhos para um futuro desenvolvimento.

CAPÍTULO 2 - VISÃO GERAL SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2.1 - Considerações Iniciais

Neste capítulo são abordados os conceitos gerais e as definições básicas sobre qualidade da energia elétrica com o enfoque em produto e serviço, e os motivos que levaram ao recente interesse das concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos ao tema.

São apresentados os principais distúrbios vinculados à qualidade, tais como: transitórios, variações de tensão de curta e longa duração, desequilíbrios, distorção da forma de onda, flutuações de tensão e variações de frequência. Devido a importância dos afundamentos de tensão, também citamos as razões que o colocam em posição de destaque no contexto da QEE.

2.2 – O crescente interesse em Qualidade da Energia Elétrica

O interesse pela QEE deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletro-eletrônicos, hoje largamente utilizados nos diversos segmentos de atividade, seja ele industrial, comercial ou residencial.

Hoje, com a grande aplicação da eletrônica de potência, da microeletrônica e dos microprocessadores em uma diversidade de equipamentos, desde os relógios digitais domésticos às linhas de processo automatizadas, tem aumentado significativamente a sensibilidade destes equipamentos em relação a distúrbios da QEE.

Com a modernização do parque industrial brasileiro, houve a introdução massiva de processos controlados eletronicamente. Isto tem destacado um aspecto de vital importância da QEE e que diz respeito à sensibilidade destas cargas frente a variações momentâneas de tensão, inevitáveis no sistema elétrico e resultantes de curto-circuitos em extensas áreas, mesmo que localizadas em pontos remotos do sistema elétrico. Tais distúrbios, conhecidos na literatura internacional como voltage sags, e neste trabalho, denominados por afundamentos de tensão, representam atualmente, um dos principais problemas enfrentados pelas empresas de energia, consumidores e fornecedores de equipamentos em geral. Outros distúrbios como: harmônicos, desequilíbrios, flicker, transitórios, variações de frequência, etc, também são anomalias, constituindo-se em problemas no fornecimento de energia elétrica, podendo se manifestar tanto na tensão, como na corrente e frequência, resultando geralmente em falha ou má operação, sobretudo, de equipamentos industriais, comerciais e residenciais.

Deve-se estabelecer ações conjuntas das empresas de energia elétrica, consumidores e fabricantes de equipamentos, de tal forma que os problemas relativos à QEE sejam prognosticados e solucionados antecipadamente na fase de elaboração dos projetos, especificação e compra dos equipamentos, pois uma vez implantados os empreendimentos, os custos das soluções para os problemas de qualidade, em particular aos associados aos distúrbios citados acima, são bastante elevados e de difícil implementação.

Normalmente o procedimento das empresas de energia elétrica tem sido o de verificar se o projeto elétrico e as proteções associadas à subestação de entrada do consumidor atendem exigências mínimas de padrões técnicos estabelecidos. O consumidor geralmente realiza apenas os estudos técnicos-econômicos para se obter um projeto industrial que lhe assegure um processo com custos de produção mínimos e compatíveis com a realidade do mercado de atuação, não se preocupando com a sensibilidade dos equipamentos.

Por outro lado, os fabricantes de equipamentos procuram apenas atender as especificações técnicas do consumidor final, que são voltadas, normalmente, para os processos internos. Os fornecedores ainda não têm interesse de tornar seus equipamentos menos sensíveis, visto que isto implicará em gastos adicionais, resultando na elevação dos custos finais e até na perda de competitividade no mercado.

Portanto reconhecendo a importância do assunto, conclui-se que melhor solução para os problemas apresentados é premente na fase de planejamento, e técnicas gerais de análise e de prevenção dos mesmos não têm sido desenvolvidas na proporção e velocidade esperada. No entanto as necessidades gerais dos consumidores, concessionárias e fabricantes se equivalem, devendo haver o amplo entendimento das partes com a somatória de esforços para se atingir os objetivos comuns.

2.3 – Principais Distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica

A Qualidade da Energia Elétrica - QEE, se refere a uma ampla variedade de **fenômenos eletromagnéticos conduzidos** que caracterizam a tensão e a corrente num dado tempo e local do sistema elétrico.

A Qualidade da Energia em uma determinada barra do sistema elétrico é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios:

- Transitórios (impulsivos e oscilatórios);
- Variações de Curta Duração (interrupções transitórias, afundamentos de tensão e saltos de tensão);
- Variações de Longa Duração (interrupções sustentadas, subtensões e sobretensões);
- Desequilíbrios;
- Distorção de Forma de Onda (harmônicos, corte de tensão, ruído, etc.);
- Flutuações de tensão;
- Variações de frequência.

A título de ilustração, a figura 2.1 mostra os principais distúrbios envolvendo a QEE.

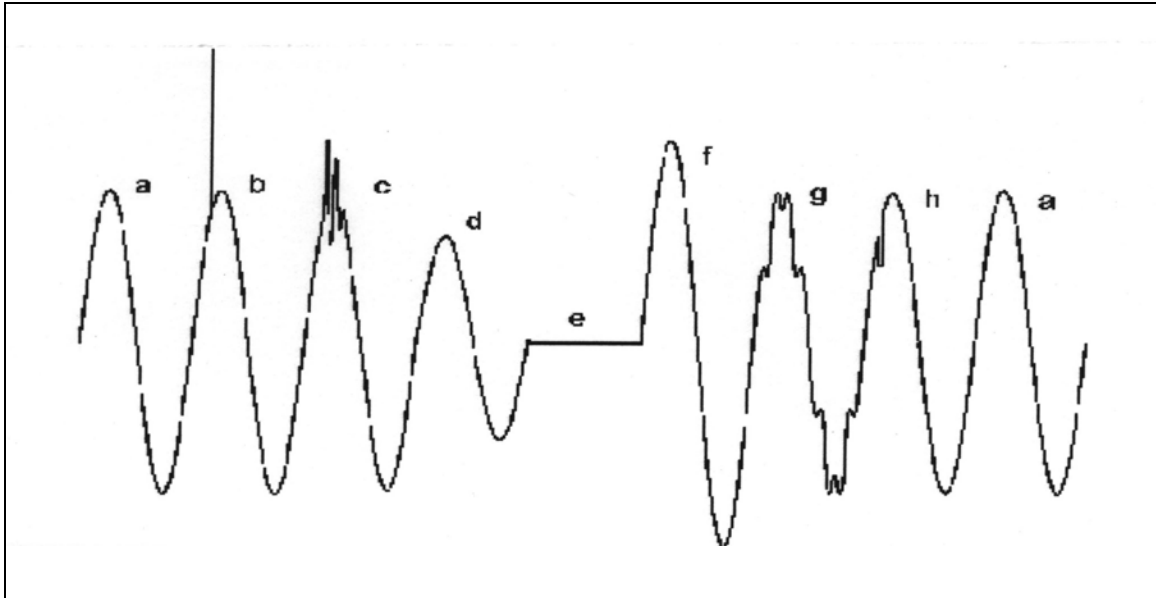


Figura 2.1- Principais Distúrbios associados a QEE

onde:

a - tensão senoidal

b- transitório impulsivo

c- transitório oscilatório

d- afundamento de tensão

e - interrupção

f- salto de tensão

g- harmônico

h- corte de tensão

Já na Tabela 2.1, são apresentadas as categorias, durações e magnitudes típicas para os distúrbios de QEE. Nota-se que para os distúrbios apresentados tanto na Figura 2.1 como na Tabela 2.1, busca-se aplicar uma das propostas de terminologia nacional para o assunto.

Tabela 2.1 - Classificação Geral dos Distúrbios da QEE

Categorias	Durações	Magnitudes
Transitórios		
Impulsivos	50 ns - 1 ms	–
Oscilatórios	5 μ s - 50 ms	0 - 8 pu
Variações de Curta Duração		
Interrupção Transitória	0,5 ciclos - 1 minuto	< 0,1 pu
Afundamento de Tensão	idem	0,1 - 0,9 pu
Salto de Tensão	idem	1,1 - 1,8 pu
Variações de Longa Duração		
Interrupção Sustentada	>1 minuto.	0,0 pu
Subtensões	idem	0,8 - 0,9 pu
Sobretensões	idem	1,1 - 1,2 pu
Desequilíbrios	estado permanente	0,05 - 0,02 pu
Distorção de Forma de Onda		
Harmônicos	estado permanente	0 - 0,2 pu
Corte de Tensão	idem	–
Ruído	idem	0 - 0,01 pu
Flutuação de Tensão	intermitente	0,001 - 0,07 pu
Variações de Freqüência	< 10 s	–

2.4 - Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma Visão Geral sobre Qualidade da Energia Elétrica, os conceitos fundamentais, o crescente interesse no tema e os principais distúrbios que ocorrem nos sistemas das empresas concessionárias e consumidores. Estes distúrbios afetam o desempenho dos equipamentos, dos processos produtivos na indústria e no comércio, e muitas vezes interferem também no cotidiano das pessoas, gerando prejuízos para a sociedade, e desconforto para os consumidores.

CAPÍTULO 3 - POSTULAÇÃO AO PROBLEMA

3.1 - Considerações Iniciais

Para o desenvolvimento e implementação do método proposto para a determinação de sobretensões provocadas pela instalação de banco de capacitores em indústrias de pequeno porte com cargas não - lineares, tomou-se como base uma indústria de forjados cuja carga principal é um forno de indução.

Eletricamente, o forno é constituído por um retificador controlado que alimenta um inversor, cuja carga é um circuito ressonante composto de um indutor e de um conjunto de capacitores, conforme mostra a figura 3.1.

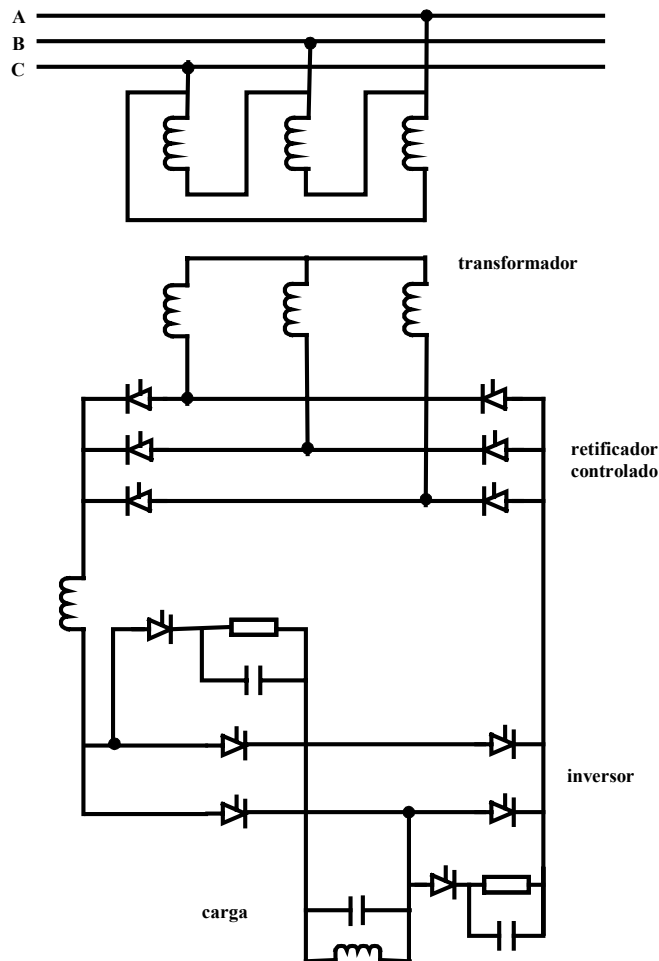


Figura 3.1 - Forno de Indução

O inversor alimenta o indutor com alta frequência que através de correntes parasitas aquece as peças metálicas a serem forjadas. O capacitor tem por finalidade tornar a carga do inversor praticamente resistiva. A potência do forno é controlada através do ângulo de disparo do retificador controlado.

Se o transformador não tiver a tensão do secundário convenientemente escolhida ou ajustada, através de *taps* no enrolamento primário, o ângulo de disparo pode tornar-se alto, o que significa uma redução do fator de potência da instalação, conforme mostra a equação 3.1.

$$F.P. = f_d \cos \alpha \quad (3.1)$$

onde:

$F.P.$	-	Fator de Potência
f_d	-	Fator de Distorção
α	-	Ângulo de Disparo do Retificador

Para especificação do equipamento para a correção do fator de potência e sua localização no sistema elétrico, foram feitas medições com o objetivo de:

- Determinar o fator de potência atual;
- Determinar o conteúdo harmônico da corrente elétrica nos diversos pontos do sistema;
- Determinar as características operacionais do conversor de alimentação do forno de indução.

Além das medições, foi feito um levantamento junto à concessionária de energia elétrica com o objetivo de se obter o perfil de consumo de potências ativa e reativa ao longo do dia durante um determinado período de tempo.

3.2 - Medições dos harmônicos de corrente

Tomando como base o diagrama unifilar da indústria, Anexo A, verifica-se que o maior consumidor da planta é o forno de indução, que opera atualmente com 700 kW, alimentado por um transformador de 1200 kVA.

Por se tratar da única carga não-linear do sistema elétrico, as medições e registros para a determinação do conteúdo harmônico da corrente foram feitas no secundário do transformador do conversor.

Foi também registrada a forma de onda da tensão e da corrente no lado de corrente contínua do conversor. A figura 3.2 mostra o local onde foram realizadas as medições:

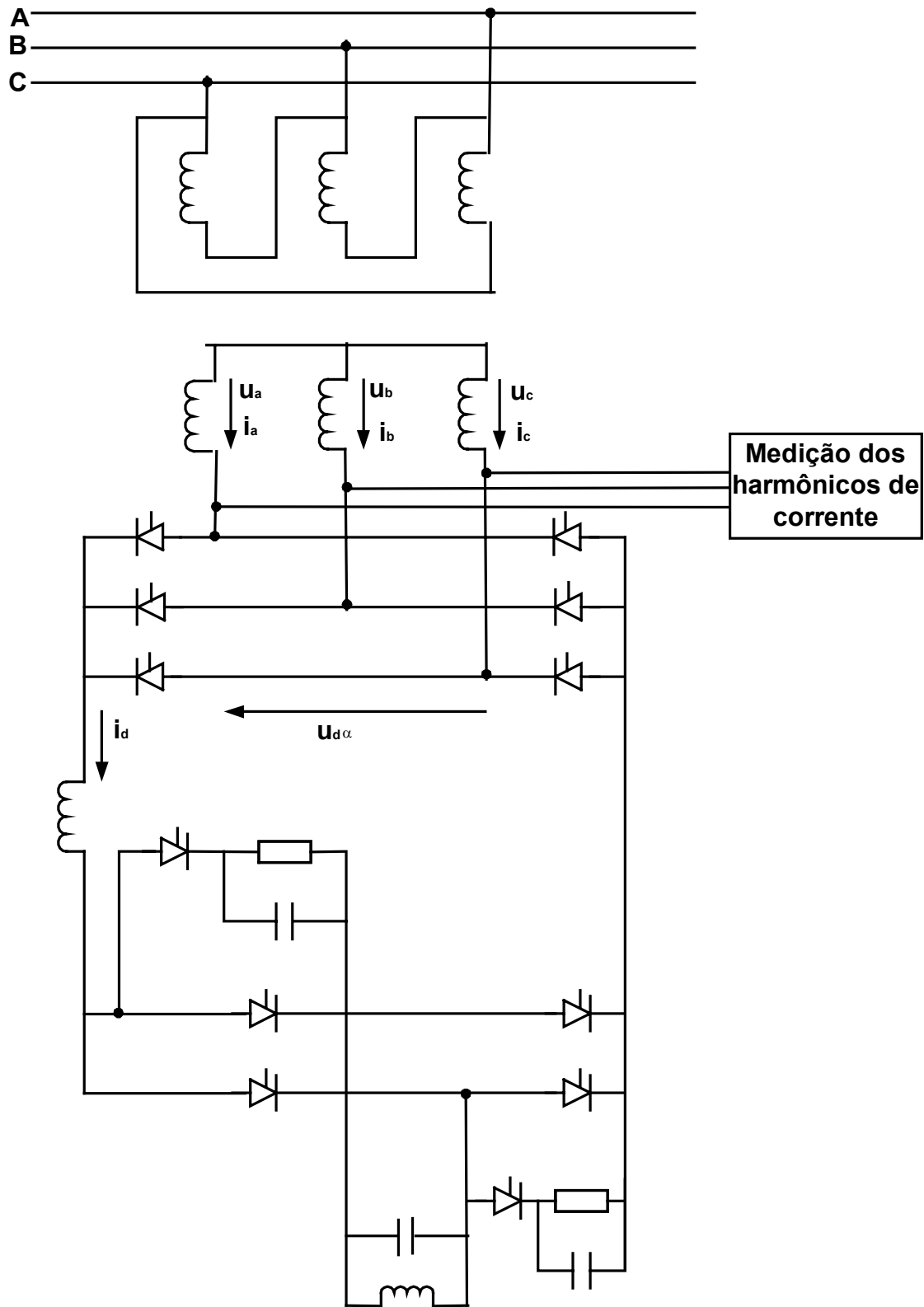
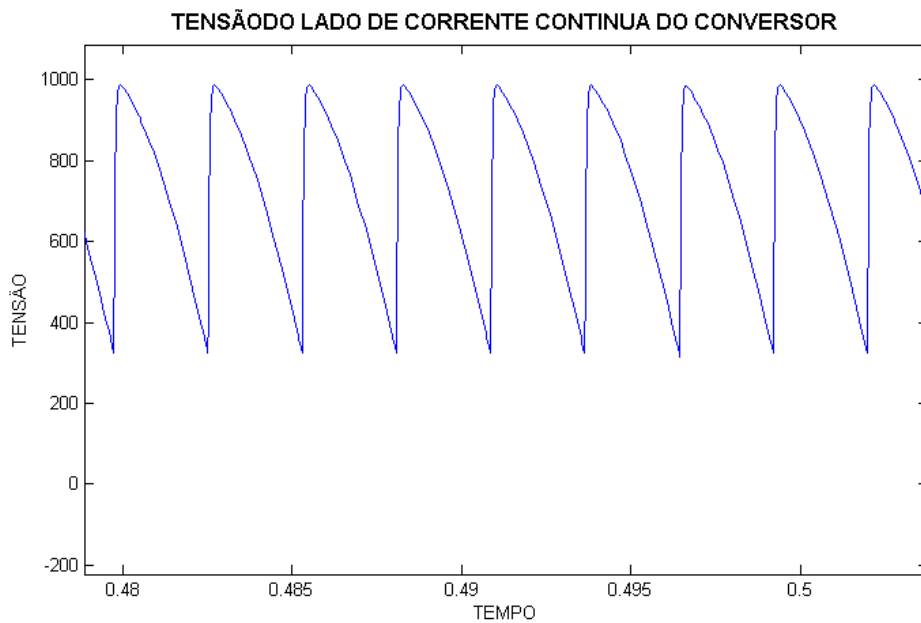


Figura 3.2 - Medição dos Harmônicos de Corrente

A figura 3.3 mostra as formas de onda das tensões de linha do secundário do transformador (a) e da tensão no lado de corrente contínua do conversor (b).



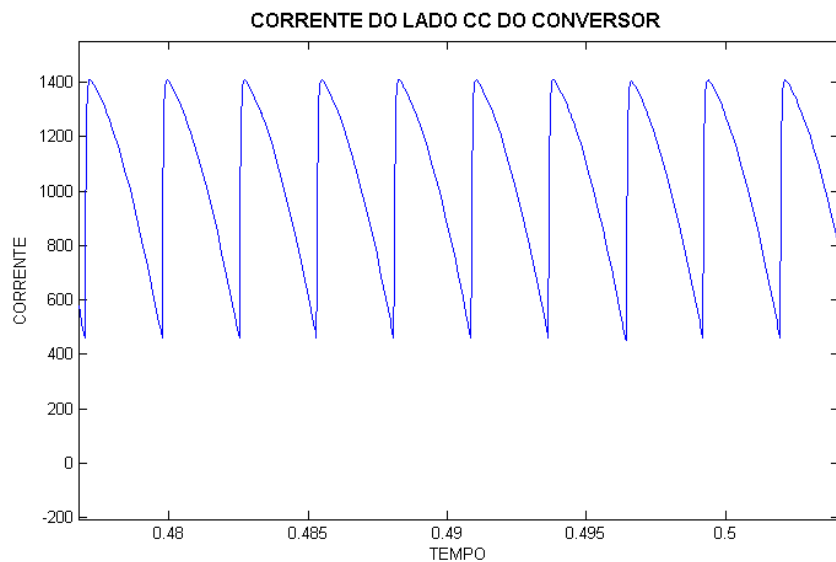
(a)



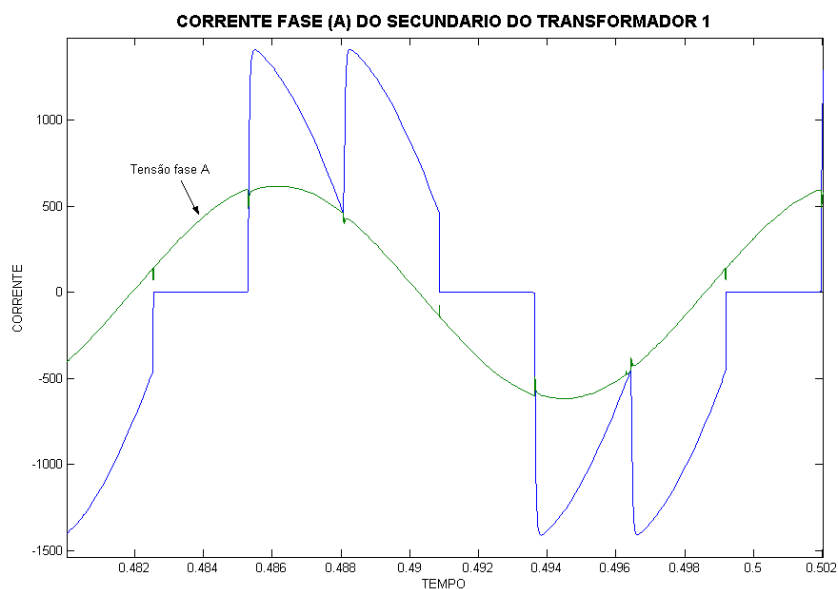
(b)

Figura 3.3 - (a) Formas de Onda das Tensões de linha no secundário do Transformador; (b) Tensão no lado de corrente contínua do Conversor

A figura 3.4 mostra as formas de onda da corrente no lado de corrente contínua do conversor (a) e da corrente de linha de fase A do secundário do transformador (b). As correntes nas outras fases têm comportamentos semelhantes ao da fase A. A tensão na fase A também é mostrada, com a finalidade de determinação do ângulo de disparo do conversor.



(a)



(b)

Figura 3.4 - (a) Formas de onda das correntes no lado de corrente contínua do Conversor; (b). Formas de onda da corrente na fase A do secundário do Transformador

O conteúdo harmônico que caracteriza e define a corrente no lado alternado do conversor é mostrado na tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Resultado das Medições dos Harmônicos de Corrente

Harmônico	Amplitude (amp. rms)	Amplitude (amp. pico)	Ângulo (graus)
1	810,00	1145,51	42,88
5	161,09	227,81	34,15
7	115,90	163,91	120,71
11	74,04	104,70	110,00
13	60,93	86,17	160,64

3.3 - Dados Referentes às Potências Ativa e Reativa, fornecidos pela Concessionária

A tabela 3.2, a seguir, mostra a título de exemplo uma pequena parte do registro das medições das potências ativa e reativa, realizadas durante 37 dias pela concessionária de energia elétrica.

Tabela 3.2 - Medições de Potência Ativa e Reativa realizadas pela Concessionária

Hora	P (kW)	Q (kVAr)
9h00	713	791
9h15	710	794
9h30	709	778
9h45	711	796
10h00	708	800
10h15	706	811
10h30	694	806
10h45	700	833

3.4 - Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados as medições dos harmônicos de corrente e das potências ativas, reativas e aparentes da indústria. A partir da tabela 3.2, pode-se observar um baixo fator de potência no sistema, indicando, portanto, a necessidade de medidas corretoras que serão aplicadas no seguinte capítulo.

CAPÍTULO 4 - CÁLCULO DA POTÊNCIA DOS BANCOS DE CAPACITORES

4.1 - Considerações Iniciais

Neste capítulo será verificado que o fator de potência da instalação está abaixo do exigido pela norma atual, isto implica em pagamento de multa para a concessionária de energia elétrica.

Também serão apresentados os cálculos realizados para determinação da potência reativa a ser fornecida pelo banco ou bancos de capacitores e sugestões para a localização destes equipamentos no sistema elétrico da empresa.

4.2 - Fator de Potência do Conversor

O Fator de Potência da instalação pode ser calculado a partir dos dados das medições realizadas pela concessionária, como no caso da tabela 4.2 do capítulo anterior.

Como o maior responsável pela redução do fator de potência é o conversor do forno de indução, será apresentada a seguir uma formulação própria que permite a determinação do mesmo apenas para o conversor. A figura 4.1 mostra o conversor do forno de indução controlado ligado em ponte trifásica alimentado por uma carga resistiva.

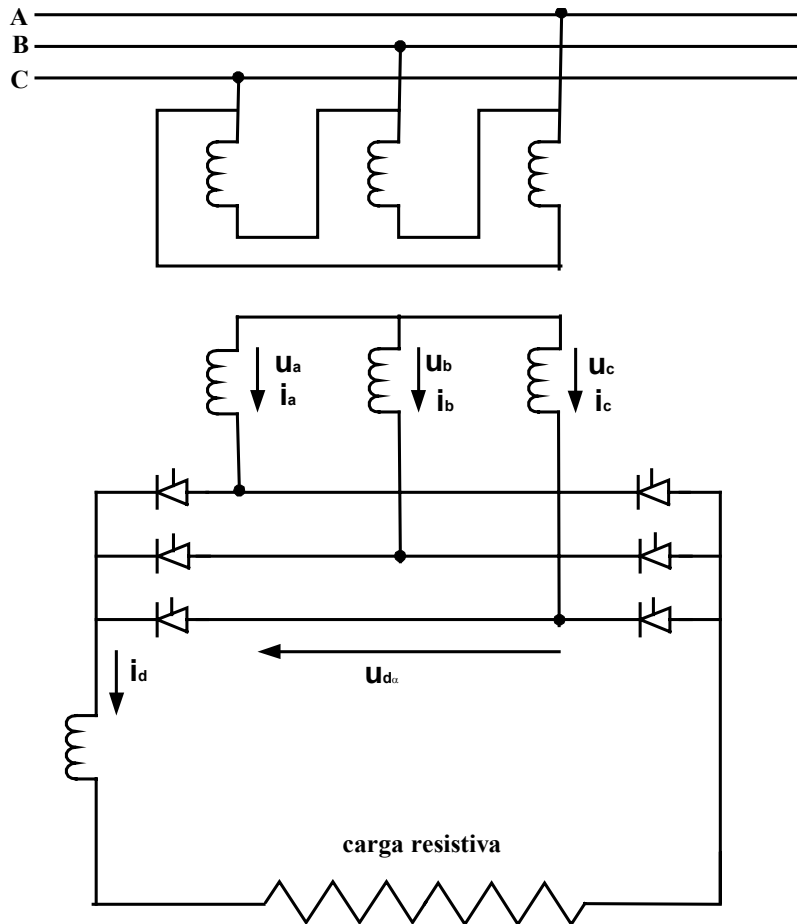


Figura 4.1 - Conversor do Forno de Indução

A corrente na saída do conversor é mostrada na figura 4.2:

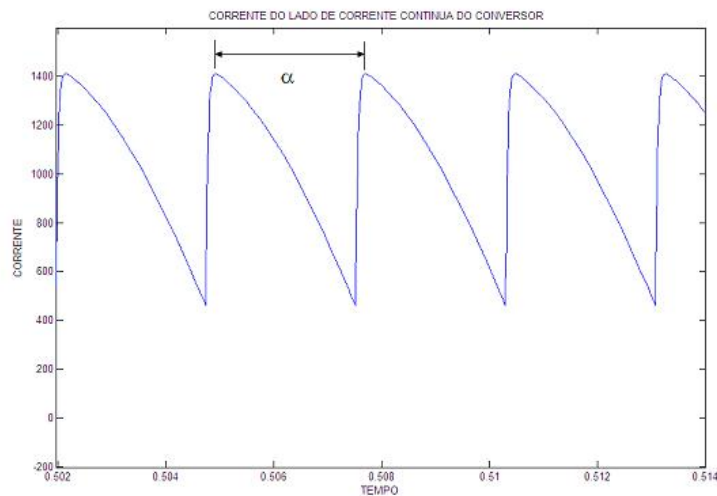


Figura 4.2 - Corrente na saída do Conversor

Onde α é o ângulo de disparo da ponte conversora.

Segundo Cortez de Sá (2002) o valor eficaz da corrente no secundário do transformador será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha} \left(\sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 d\omega t} \quad (4.1)$$

$$I_2 = \frac{2U_2}{\sqrt{\pi}R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.2)$$

$$I_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi}(1.35)} \cdot \frac{I_d}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.3)$$

$$I_2 = 0,836 \frac{I_d}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.4)$$

Com relação à potência da carga vale estabelecer a seguinte relação:

$$P_R = P_d \quad (4.5)$$

então podemos dizer que,

$$P_R = R \cdot I_{d(ef)}^2 \quad (4.6)$$

onde:

$$I_{d(ef)} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \left(\sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t\right)^2 d\omega t} \quad (4.7)$$

$$I_{d(ef)} = \frac{\sqrt{6}U_2}{\sqrt{\pi R}} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.8)$$

resultando então,

$$P_R = 1,91 \frac{U_2^2}{R} \left[\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha \right] \quad (4.9)$$

Para potência P_d tem-se:

$$P_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \left(\sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t\right) d\omega t \quad (4.10)$$

$$P_d = 1,91 \frac{U_2^2}{R} \left[\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha \right] \quad (4.11)$$

A potência aparente, será dada por:

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (4.12)$$

$$S = 1,073 \frac{U_d I_d}{\cos^2 \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.13)$$

$$S = 1,956 \frac{U_2^2}{R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.14)$$

O fator de potência será:

$$F.P. = \frac{P_R}{S} \quad (4.15)$$

$$F.P. = \frac{1,91 \frac{U_2^2}{R} \left[\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha \right]}{1,956 \frac{U_2^2}{R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha}} \quad (4.16)$$

$$F.P. = 0,976 \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (4.17)$$

Como o conversor opera na maior parte do tempo com $\alpha = 43^\circ$, o fator de potência do mesmo será:

$$F.P. = 0,726$$

4.3 - Fator de Potência da Instalação

O Fator de Potência da instalação pode ser calculado a partir dos dados da concessionária. Tomando como base a tabela 4.2, verifica-se que as potências ativa e reativa médias ao longo do período de operação da indústria podem ser admitidas como:

$$P = 700 \text{ (kW)}$$

$$Q = 800 \text{ (kVAr)}$$

É importante lembrar que a potência reativa medida é resultado da soma algébrica das potências reativas de deslocamento e de distorção.

A potência aparente será:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{4.18}$$

$$S = \sqrt{700^2 + 800^2}$$

$$S = 1063,014 \text{ (kVA)}$$

O Fator de Potência médio da instalação será então:

$$F.P = \frac{700}{1063,014}$$

$$F.P = 0,658$$

4.4 - Cálculo da Potência dos Bancos de Capacitores

Tendo-se admitido que a maior parte da potência reativa é de deslocamento, admitiu-se que a correção do fator de potência poderia ser feita através da instalação de bancos de capacitores. Pretende-se corrigir o fator de potência para F.P. = 0,95. Isto significa que a potência aparente deverá ser em média:

$$S_{corr} = \frac{700}{0,95}$$

$$S_{corr} = 736,84 \quad (kVA)$$

Logo, a potência reativa corrigida será:

$$Q_{corr} = \sqrt{S_{corr}^2 - P^2} \quad (4.19)$$

$$Q_{corr} = \sqrt{736,84^2 - 700^2}$$

$$Q_{corr} = 230,072 \quad (kVAr)$$

Desta forma, o banco de capacitores deverá fornecer:

$$Q_{BC} = 800 - 230 = 570 \quad (kVAr)$$

4.5 - Localização do Banco de Capacitores

Existem duas possibilidades para a instalação dos bancos de capacitores:

- Instalação de modo que toda a potência reativa necessária seja fornecida por um único banco de capacitores;
- Instalação distribuída de bancos de capacitores, sendo que cada motor teria compensação individual e o restante da potência reativa seria fornecida por um único banco.

4.5.1 - Banco Único de Capacitores

Para a instalação de um único banco de capacitores, são sugeridas duas possibilidades:

- Banco de capacitores instalado no barramento de 13,8 kV;
- Banco de capacitores instalado no secundário do transformador do forno de indução.

a) *Banco de capacitores no barramento de 13,8 kV.*

A figura 4.3 mostra o local de instalação do banco de capacitores,

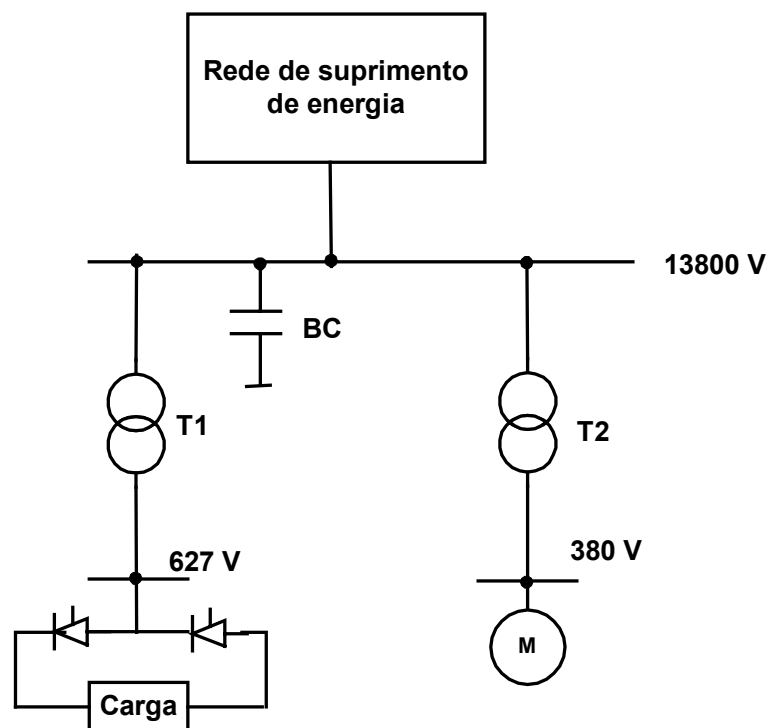


Figura 4.3 - Banco de Capacitores no barramento de 13,8 kV

O banco de capacitores deverá fornecer 570 kVAr, em 13800 V. Admitindo que a tensão nominal do banco seja de 15 kV, a potência nominal do banco deverá ser no mínimo:

$$Q_{BC(nova)} = 570 * \left(\frac{15}{13,8} \right)^2$$

$$Q_{BC(nova)} = 673,44 \text{ (kVAr)}$$

4.4. Usualmente, o banco é instalado em estrela dupla, conforme mostrado na figura

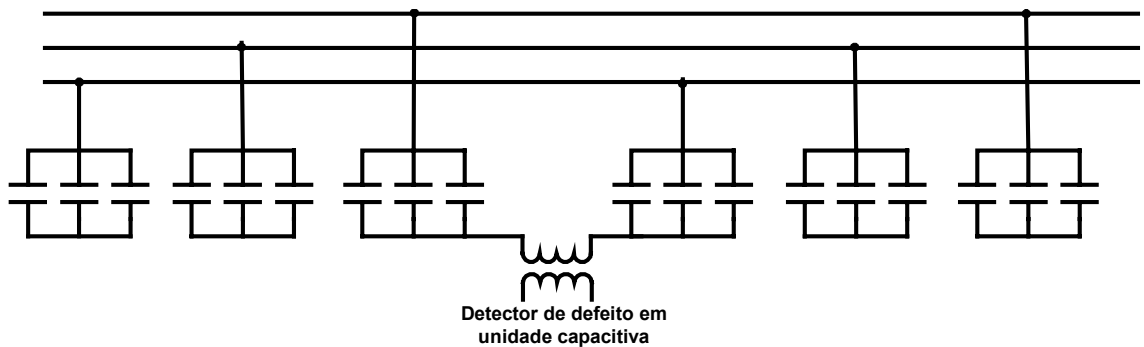


Figura 4.4 - Instalação do Banco de Capacitores em estrela dupla

Esta forma de instalação exige que a potência do banco seja numericamente múltipla de 6. Desta forma, recomenda-se para potência nominal do banco:

$$Q_{BC(nova)} = 720 \text{ (kVAr)}$$

b) *Banco de capacitores instalado no secundário do transformador do forno de indução.*

A figura 4.5 mostra o local de instalação do banco de capacitores:

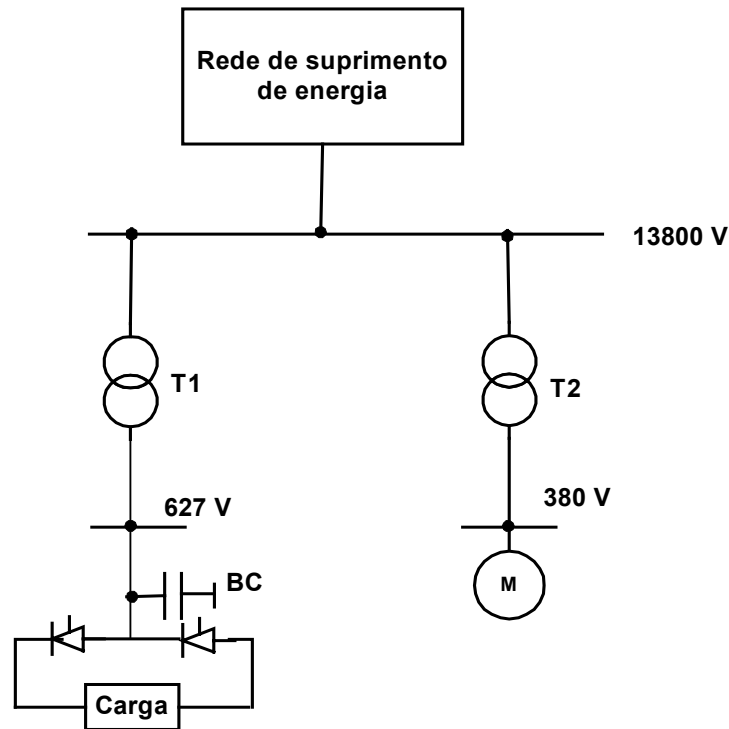


Figura 4.5 - Banco de Capacitores no barramento de 627 V

O banco de capacitores deverá fornecer 570 kVAr, em 627 V. Admitindo que a tensão nominal do banco seja de 750 V, a potência nominal do banco deverá ser no mínimo:

$$Q_{BC(nova)} = 570 * \left(\frac{750}{627} \right)^2$$

$$Q_{BC(nova)} = 815,57 \text{ (kVAr)}$$

Conforme mostra a figura 4.4, recomenda-se que a potência do banco seja:

$$Q_{BC(nova)} = 900 \text{ (kVAr)}$$

4.5.2 - Instalação Distribuída dos Bancos de Capacitores

Neste caso, cada motor terá um banco de capacitores próprio. Usualmente o banco de capacitores para correção do fator de potência do motor deve ter uma potência de aproximadamente 35% da potência nominal do motor.

Desta forma tem-se:

Tabela 4.1 - Potência nominal dos Bancos de Capacitores

Motor	P_N (motor) kW	Q_{BC} (banco) kVAr	U_{BCN} V
M1	75	30	380
M2	130	50	380
M3	25	10	380
M4	75	30	380

A potência reativa total dos bancos dos motores será de:

$$Q_{BC(M)} = 120 \text{ (kVAr)}$$

Isto significa que o outro banco de capacitores deverá fornecer no mínimo:

$$Q_{BC} = 450 \text{ (kVAr)}$$

Este banco poderá ser instalado no barramento de 13800 V ou no secundário do transformador do forno de indução.

- a) *Compensação individual dos motores e banco de capacitores no barramento de 13,8 kV*

A figura 4.6 mostra o local de instalação dos bancos de capacitores,

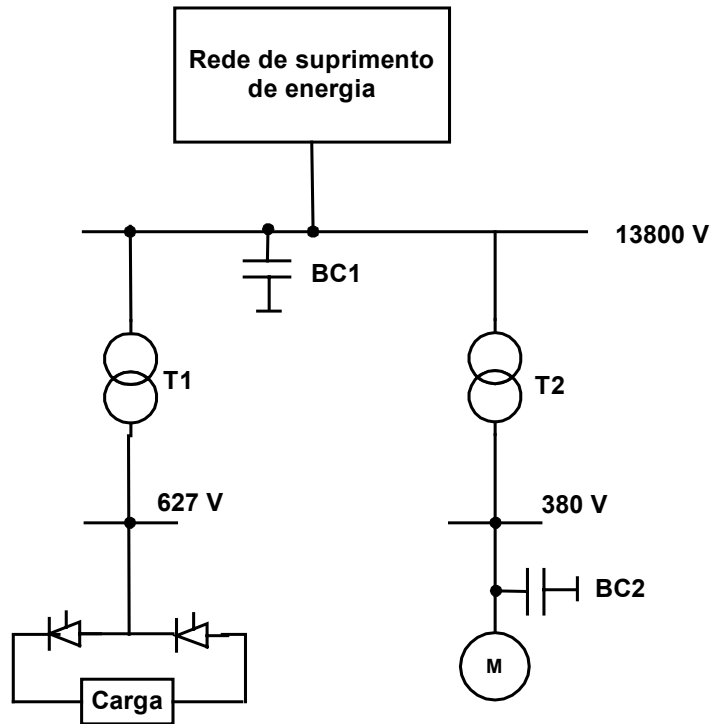


Figura 4.6 - Banco de Capacitores no barramento de 13.8 kV e no barramento do motor equivalente

Os motores foram representados por um motor equivalente, o mesmo ocorrendo com os respectivos bancos de capacitores.

O banco de capacitores deverá fornecer 450 kVAr, em 13800 V. Admitindo que a tensão nominal do banco seja de 15 kV, a potência nominal do banco deverá ser no mínimo de:

$$Q_{BC(nova)} = 450 * \left(\frac{15}{13,8} \right)^2$$

$$Q_{BC(nova)} = 531,66 \text{ (kVAr)}$$

Conforme mostrada na figura 4.4, recomenda-se que a potência do banco seja:

$$Q_{BC(nova)} = 540 \text{ (kVAr)}$$

- b) *Compensação individual dos motores e banco de capacitores no barramento de 627 V e no motor equivalente.*

A figura 4.7 mostra o local de instalação dos bancos de capacitores,

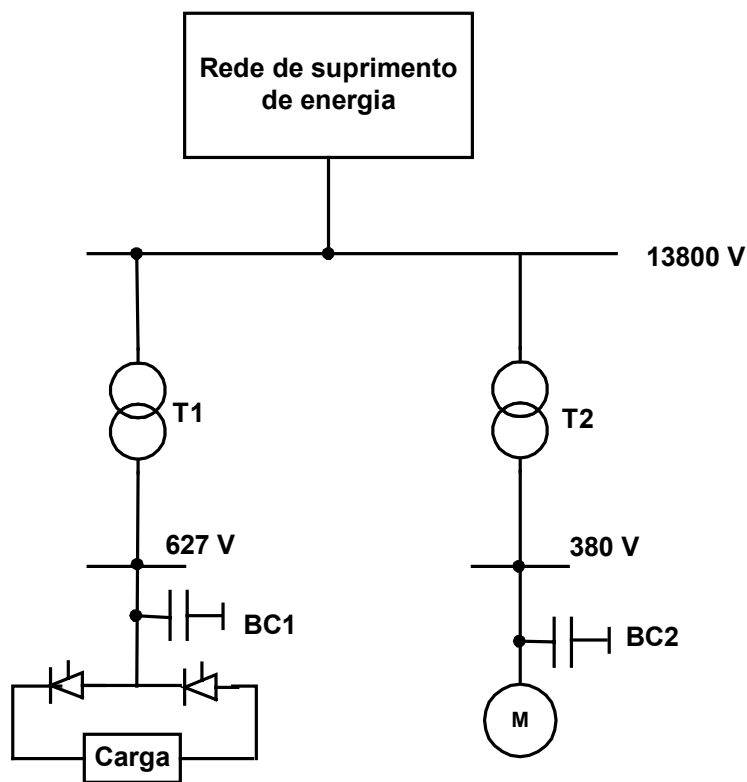


Figura 4.7 - Banco de Capacitores no barramento de 627 V e no barramento do motor equivalente

Aqui, também, os motores foram representados por um motor equivalente e o mesmo ocorrendo com os respectivos bancos de capacitores.

O banco de capacitores deverá fornecer 450 kVAr, em 627 V. Admitindo que a tensão nominal do banco seja de 750 V, a potência nominal do banco deverá ser no mínimo:

$$Q_{BC(nova)} = 450 * \left(\frac{750}{627} \right)^2$$

$$Q_{BC(nova)} = 643,87 \text{ (kVAr)}$$

Conforme mostrada na figura 4.4, recomenda-se que a potência do banco seja:

$$Q_{BC(nova)} = 660 \text{ (kVAr)}$$

4.6 - Considerações Finais

Neste capítulo foi determinada a potência reativa total necessária para a correção do fator de potência. Foram também apresentadas diversas alternativas para a instalação dos bancos de capacitores para o fornecimento desta potência reativa. Há-de-se observar, contudo, qual o comportamento do sistema após a instalação dos bancos de capacitores. Isto será visto no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA O CÁLCULO DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES PROVOCADO PELA INSTALAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES

5.1 - Considerações Iniciais

Em um sistema com cargas não lineares, a instalação de bancos de capacitores pode provocar sobretensões resultantes de ressonância entre as reatâncias do banco e de outros equipamentos para um harmônico de ordem h produzido pelas cargas não lineares. Nestes casos, é usual que seja feito um estudo para verificação da ocorrência ou não de ressonâncias e conseqüentes sobretensões.

O método usualmente utilizado admite a carga não-linear como fonte de corrente e verifica o comportamento da impedância equivalente do sistema para o espectro harmônico das correntes.

Neste capítulo, propõe-se uma metodologia, na qual a carga não linear também é representada por uma fonte de corrente, porém incluída em um circuito que permita a determinação de equações diferenciais, cujas soluções particulares levem à determinação das tensões harmônicas.

O roteiro adotado compõe-se das seguintes etapas:

1. Obtenção do circuito elétrico equivalente a partir do diagrama unifilar da instalação elétrica;
2. Obtenção de equações diferenciais, que representem o comportamento do circuito em regime permanente;

3. Montagem da matriz para a resolução das equações diferenciais, caso o número de equações diferenciais seja maior que dois;
4. Obtenção do comportamento das tensões.

A seguir, a metodologia é aplicada para o cálculo do comportamento das tensões nos casos descritos no capítulo anterior.

5.2 - Caso I: Banco de Capacitores conectado no barramento de Alta Tensão 13,8 kV

a) Diagrama unifilar

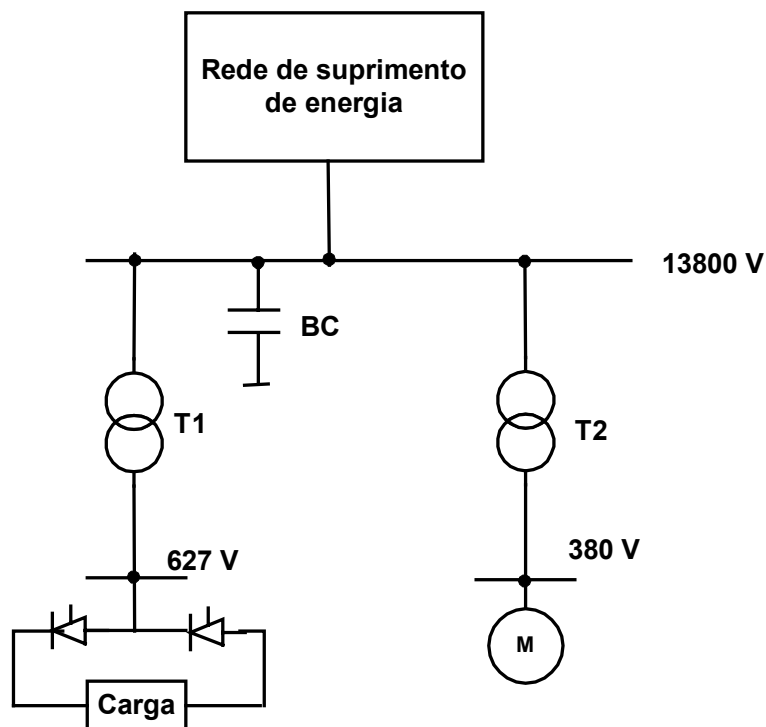


Figura 5.1 - Diagrama Unifilar Caso I

b) Circuito equivalente

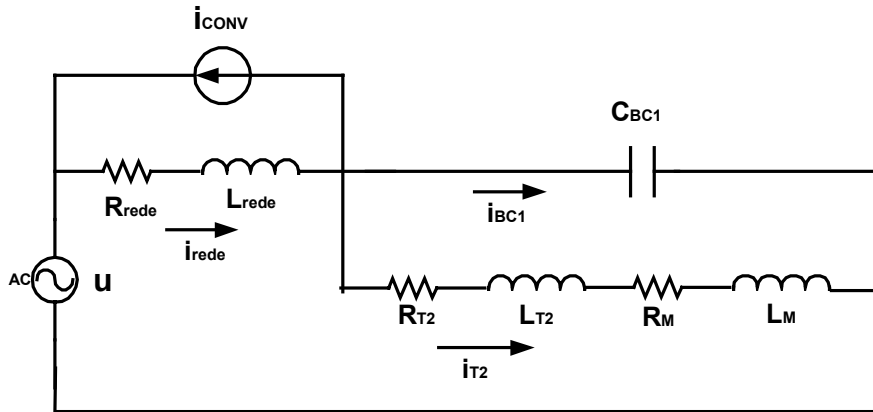


Figura 5.2 - Circuito Equivalente do Caso I

c) Sistema de equações do circuito equivalente

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{BC1} dt = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(\omega t) \quad (5.1)$$

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T2}i_{T2} + L_{T2} \frac{di_{T2}}{dt} + R_M i_{T2} + L_M \frac{di_{T2}}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(\omega t) \quad (5.2)$$

$$i_{rede} = i_{conv} + i_{BC1} + i_{T2} \quad (5.3)$$

onde:

$$i_{conv} = i_1 \cos(\omega t + \phi_1) - i_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + i_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ - i_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + i_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13})$$

reduzindo o sistema a 2 equações temos:

$$L_{rede} \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + R_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + R_{rede} \frac{di_{T2}}{dt} + \frac{1}{C_{BC1}} i_{BC1} = -L_{rede} \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - R_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - \sqrt{\frac{2}{3}} U_w \text{sen}(wt) \quad (5.4)$$

$$L_{rede} \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + (L_{rede} + L_{T2} + L_M) \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + R_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + (R_{rede} + R_{T2} + R_M) \frac{di_{T2}}{dt} = -L_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - R_{rede} i_{conv} + \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.5)$$

d) Resolução do sistema de equações

A solução particular das correntes do sistema de equações reduzido será:

$$i_{BC1} = X_{1h} \cos(h\omega t) + X_{2h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.6)$$

$$i_{T2} = X_{3h} \cos(h\omega t) + X_{4h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.7)$$

onde X_{1h} , X_{2h} , ..., X_{4h} são os coeficientes a serem determinados para a obtenção da solução particular das correntes dos bancos de capacitores.

Utilizando-se ferramentas matemáticas adequadas, chega-se a uma matriz de ordem 4 para cada um dos harmônicos existentes no sistema:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 L_{rede}] & h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} \\ -h\omega R_{rede} & \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 L_{rede}] & -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} \\ R_{rede} & h\omega L_M & (R_{rede} + R_{T2} + R_M) & h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) \\ -h\omega L_M & R_{rede} & -h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) & (R_{rede} + R_{T2} + R_M) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{1h} \\ X_{2h} \\ X_{3h} \\ X_{4h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1h} \\ A_{2h} \\ A_{3h} \\ A_{4h} \end{pmatrix}$$

onde $A_{1h}, A_{2h}, \dots, A_{4h}$ são os coeficientes dos senos e cossenos das funções conhecidas do sistema de equações

e) Corrente do banco de capacitores

A corrente do banco de capacitores será desenvolvida como uma série de Fourier em função dos harmônicos presentes,

$$\begin{aligned} i_{BC1} = & a_1 \cos(\omega t + \phi_1) - a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ & - a_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + a_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13}) \end{aligned} \quad (5.8)$$

f) Tensão no barramento do banco de capacitores

$$u_{BC1} = i_{BC1} * X_{BC1} \quad (5.9)$$

5.3 - Caso II: Banco de Capacitores conectado no barramento de Baixa Tensão 627V

a) Diagrama Unifilar

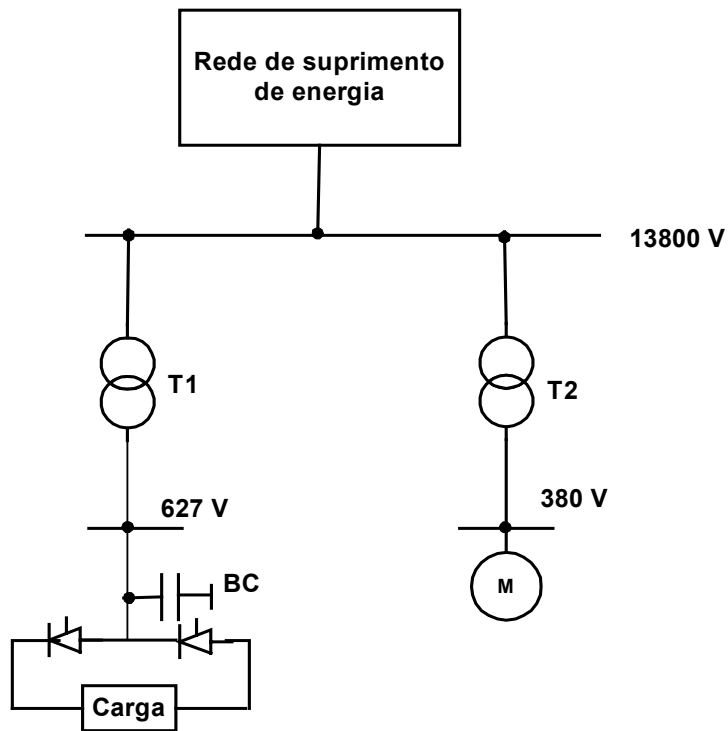


Figura 5.3 - Diagrama Unifilar Caso II

b) Circuito elétrico equivalente

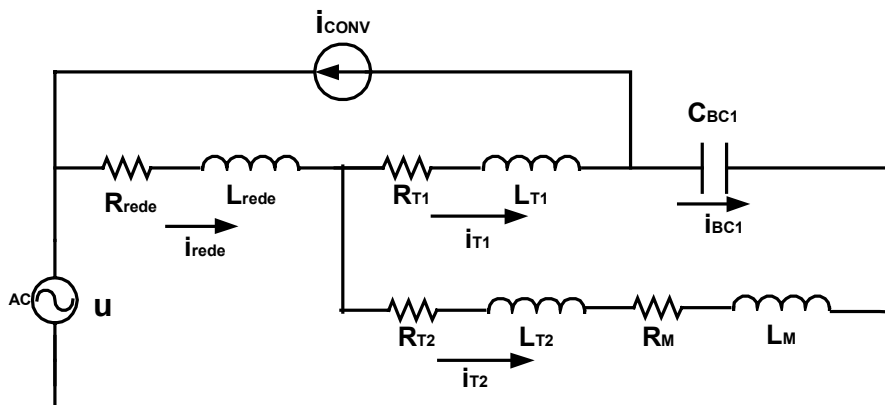


Figura 5.4 - Circuito Equivalente do Caso II

c) Sistema de equações do circuito equivalente

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T1}i_{T1} + L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt} + \frac{1}{C_{BC1}} \int i_{BC1} dt = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.10)$$

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T2}i_{T2} + L_{T2} \frac{di_{T2}}{dt} + R_M i_{T2} + L_M \frac{di_{T2}}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.11)$$

$$i_{rede} = i_{T1} + i_{T2} \quad (5.12)$$

$$i_{T1} = i_{conv} + i_{BC1} \quad (5.13)$$

onde:

$$i_{conv} = i_1 \cos(wt + \phi_1) - i_5 \cos(5wt + \phi_5) + i_7 \cos(7wt + \phi_7) - i_{11} \cos(11wt + \phi_{11}) + i_{13} \cos(13wt + \phi_{13})$$

Reduzindo o sistema a 2 equações temos:

$$\begin{aligned} & (L_{rede} + L_{T1}) \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + (R_{rede} + R_{T1}) \frac{di_{BC1}}{dt} + R_{rede} \frac{di_{T2}}{dt} + \frac{1}{C} i_{BC1} = \\ & - (L_{rede} + L_{T1}) \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - (R_{rede} + R_{T1}) \frac{di_{conv}}{dt} - \sqrt{\frac{2}{3}} U w \operatorname{sen}(wt) \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} & L_{rede} \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + (L_{rede} + L_{T2} + L_M) \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + R_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + (R_{rede} + R_{T2} + R_M) \frac{di_{T2}}{dt} = \\ & - L_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - R_{rede} i_{conv} + \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \end{aligned} \quad (5.15)$$

d) Resolução do sistema de equações

A solução particular das correntes do sistema de equações reduzido será:

$$i_{BC1} = X_{1h} \cos(h\omega t) + X_{2h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.16)$$

$$i_{T2} = X_{3h} \cos(h\omega t) + X_{4h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.17)$$

onde $X_{1h}, X_{2h}, \dots, X_{4h}$ são os coeficientes a serem determinados para a obtenção da solução particular das correntes dos bancos de capacitores.

Como anteriormente, chega-se a uma matriz de ordem 4 para cada um dos harmônicos existentes no sistema:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T1})] & h\omega(R_{rede} + R_{T1}) & -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} \\ -h\omega(R_{rede} + R_{T1}) & \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T1})] & -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} \\ R_{rede} & h\omega L_M & (R_{rede} + R_{T2} + R_M) & h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) \\ -h\omega L_M & R_{rede} & -h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) & (R_{rede} + R_{T2} + R_M) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{1h} \\ X_{2h} \\ X_{3h} \\ X_{4h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1h} \\ A_{2h} \\ A_{3h} \\ A_{4h} \end{pmatrix}$$

onde $A_{1h}, A_{2h}, \dots, A_{4h}$ são os coeficientes dos senos e cosenos das funções conhecidas do sistema de equações

e) Corrente do banco de capacitores

A corrente do banco de capacitores será desenvolvida como uma série de Fourier em função dos harmônicos presentes:

$$\begin{aligned} i_{BC1} = & a_1 \cos(\omega t + \phi_1) - a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ & - a_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + a_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13}) \end{aligned} \quad (5.18)$$

f) Tensão no barramento do banco de capacitores

$$u_{BC1} = i_{BC1} * X_{BC1} \quad (5.19)$$

5.4 - Caso III: Banco de Capacitores conectado no barramento de Alta Tensão, 13.8 kV e no barramento do Motor Equivalente.

a) Diagrama Unifilar

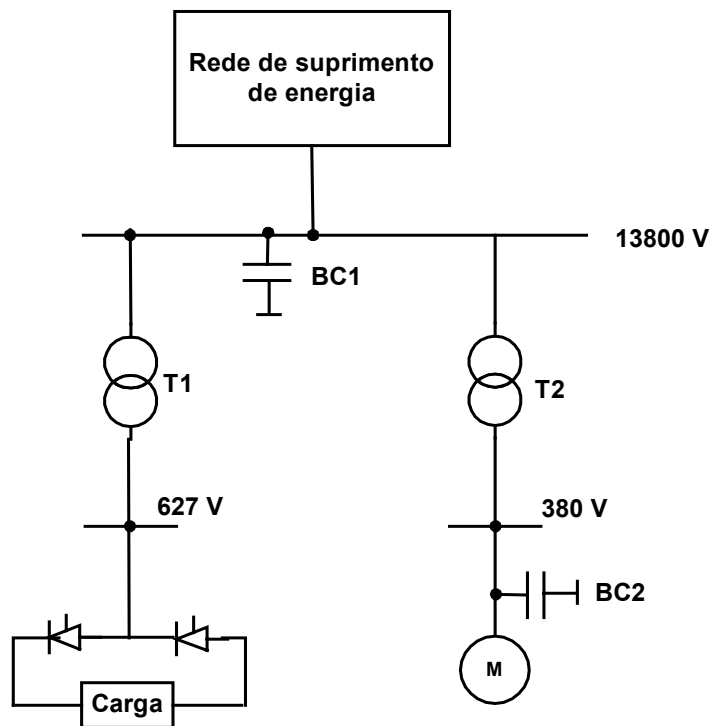


Figura 5.5 - Diagrama Unifilar Caso III

b) Circuito elétrico equivalente

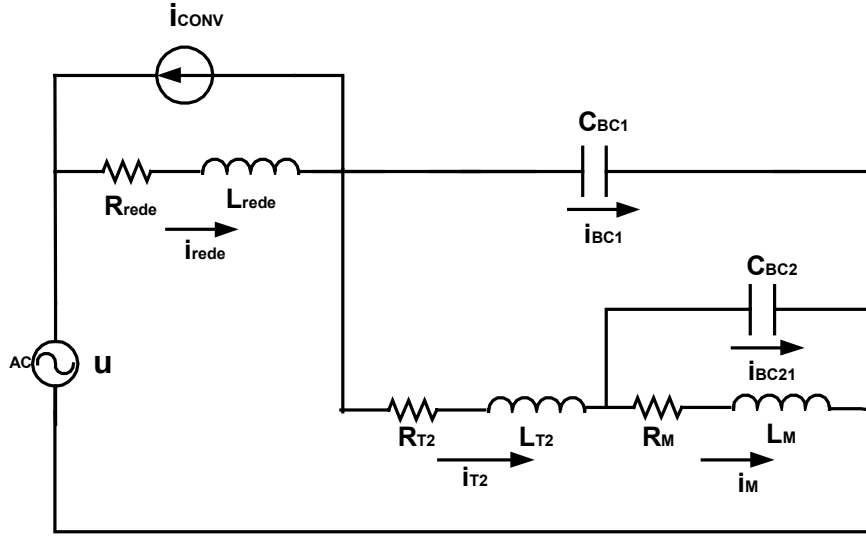


Figura 5.6 - Circuito Equivalente do Caso III

c) Sistema de equações do circuito equivalente

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + \frac{1}{C_{BC1}} \int i_{BC1} dt = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(\omega t) \quad (5.20)$$

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T2}i_{T2} + L_{T2} \frac{di_{T2}}{dt} + R_M i_M + L_M \frac{di_M}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(\omega t) \quad (5.21)$$

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T2}i_{T2} + L_{T2} \frac{di_{T2}}{dt} + \frac{1}{C_{BC2}} \int i_{BC2} dt = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(\omega t) \quad (5.22)$$

$$i_{rede} = i_{conv} + i_{T1} + i_{BC1} + i_{T2} \quad (5.23)$$

$$i_{T2} = i_M + i_{BC2} \quad (5.24)$$

onde:

$$i_{conv} = i_1 \cos(\omega t + \phi_1) - i_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + i_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ - i_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + i_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13})$$

Neste caso, temos um sistema de 6 equações diferenciais que podem ser reduzidas para 3 equações:

$$\begin{aligned}
 &+L_{rede} \frac{d^2 i_M}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} + R_{rede} \frac{di_M}{dt} + R_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + R_{rede} \frac{di_{BC2}}{dt} + \frac{1}{C_{BC1}} i_{BC1} = \\
 &-L_{rede} \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - R_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - \sqrt{\frac{2}{3}} U \omega \text{sen}(\omega t)
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

$$\begin{aligned}
 &+(L_{rede} + L_{T2} + L_M) \frac{di_M}{dt} + L_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + (L_{rede} + L_{T2}) \frac{di_{BC2}}{dt} + (R_{rede} + R_{T2} + R_M) i_M + R_{rede} i_{BC1} \\
 &+(R_{rede} + R_{T2}) i_{BC2} = -L_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - R_{rede} i_{conv} + \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(\omega t)
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

$$\begin{aligned}
 &(L_{rede} + L_{T2}) \frac{d^2 i_M}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + (L_{rede} + L_{T2}) \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} + (R_{rede} + R_{T2}) \frac{di_M}{dt} + (R_{rede} + R_{T2}) \frac{di_{BC2}}{dt} \\
 &+ R_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + \frac{1}{C_{BC2}} i_{BC2} = -L_{rede} \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - R_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - \sqrt{\frac{2}{3}} U \omega \text{sen}(\omega t)
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

d) Resolução do sistema de equações

A solução particular das correntes do sistema de equações reduzido será:

$$i_{BC1} = X_{1h} \cos(h\omega t) + X_{2h} \text{sen}(h\omega t) \tag{5.28}$$

$$i_{BC2} = X_{3h} \cos(h\omega t) + X_{4h} \text{sen}(h\omega t) \tag{5.29}$$

$$i_M = X_{5h} \cos(h\omega t) + X_{6h} \text{sen}(h\omega t) \tag{5.30}$$

onde $X_{1h}, X_{2h}, \dots, X_{6h}$ são os coeficientes a serem determinados para a obtenção da solução particular das correntes dos bancos de capacitores.

Utilizando ferramentas matemáticas, chegamos a uma matriz de ordem 6 para cada um dos harmônicos existentes no sistema:

$$\begin{vmatrix}
 -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} & \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 L_{rede}] & h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} \\
 -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} & -h\omega R_{rede} & \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 L_{rede}] & -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} \\
 (R_{rede} + R_{T2} + R_M) & h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) & R_{rede} & h\omega L_M & (R_{rede} + R_{T2}) & h\omega(L_{rede} + L_{T2}) \\
 -h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) & (R_{rede} + R_{T2} + R_M) & -h\omega L_M & R_{rede} & -h\omega(L_{rede} + L_{T2}) & (R_{rede} + R_{T2}) \\
 -(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2}) & (h\omega)(R_{rede} + R_{T2}) & -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} & \frac{1}{C_{BC2}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2})] & (h\omega)(R_{rede} + R_{T2}) \\
 -(h\omega)(R_{rede} + R_{T1}) & -(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2}) & -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} & -(h\omega)(R_{rede} + R_{T2}) & \frac{1}{C_{BC2}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2})]
 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X_{1h} \\ X_{2h} \\ X_{3h} \\ X_{4h} \\ X_{5h} \\ X_{6h} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{1h} \\ A_{2h} \\ A_{3h} \\ A_{4h} \\ A_{5h} \\ A_{6h} \end{vmatrix}$$

onde A_{1h} , A_{2h} , ..., A_{6h} são os coeficientes dos senos e cossenos das funções conhecidas do sistema de equações.

e) Correntes do banco de capacitores

A corrente do banco de capacitores será desenvolvida como uma série de Fourier em função dos harmônicos presentes

$$\begin{aligned} i_{BC1} = & a_1 \cos(\omega t + \phi_1) - a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ & - a_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + a_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13}) \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} i_{BC2} = & a_1 \cos(\omega t + \phi_1) - a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ & - a_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + a_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13}) \end{aligned} \quad (5.32)$$

f) Tensão no barramento dos banco de capacitores

$$u_{BC1} = i_{BC1} * X_{BC1} \quad (5.33)$$

$$u_{BC2} = i_{BC2} * X_{BC2} \quad (5.34)$$

5.5 - Caso IV: Banco de Capacitores conectado no barramento de Baixa Tensão, 627 V e no barramento do Motor Equivalente.

a) Diagrama Unifilar

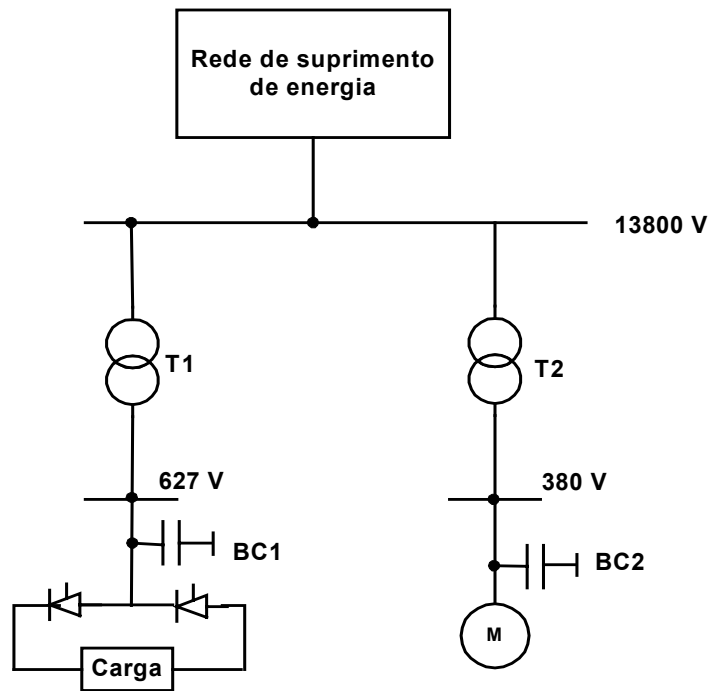


Figura 5.7 - Diagrama Unifilar Caso IV

b) Circuito elétrico equivalente

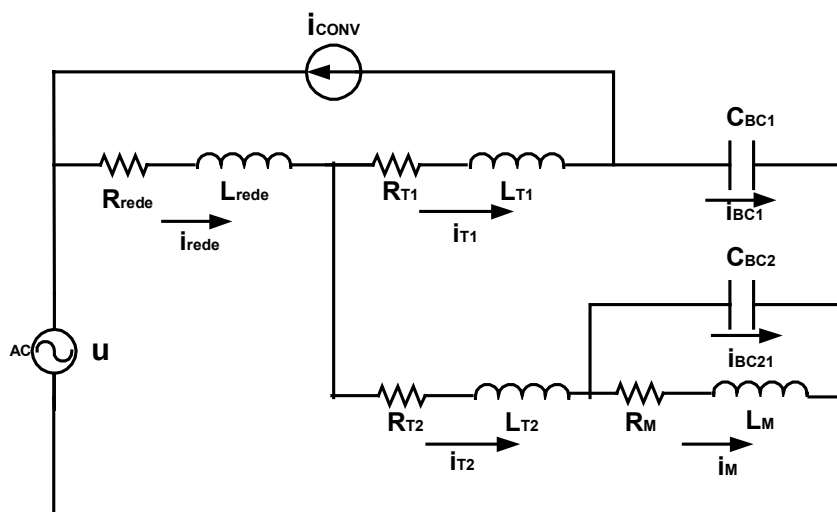


Figura 5.8 - Circuito Equivalente do Caso IV

c) Sistema de equações do circuito equivalente

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T1}i_{T1} + L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt} + \frac{1}{C_{BC1}} \int i_{BC1} dt = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.35)$$

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T2}i_{T2} + L_{T2} \frac{di_{T2}}{dt} + R_M i_M + L_M \frac{di_M}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.36)$$

$$R_{rede}i_{rede} + L_{rede} \frac{di_{rede}}{dt} + R_{T2}i_{T2} + L_{T2} \frac{di_{T2}}{dt} + \frac{1}{C_{BC2}} \int i_{BC2} dt = \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.37)$$

$$i_{rede} = i_{T1} + i_{T2} \quad (5.38)$$

$$i_{T1} = i_{conv} + i_{BC1} \quad (5.39)$$

$$i_{T2} = i_M + i_{BC2} \quad (5.40)$$

onde:

$$i_{conv} = i_1 \cos(wt + \phi_1) - i_5 \cos(5wt + \phi_5) + i_7 \cos(7wt + \phi_7) - i_{11} \cos(11wt + \phi_{11}) + i_{13} \cos(13wt + \phi_{13})$$

Neste caso, temos um sistema de 6 equações diferenciais que podem ser reduzidas para 3 equações:

$$L_{rede} \frac{d^2 i_M}{dt^2} + (L_{rede} + L_{T1}) \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} + R_{rede} \frac{di_M}{dt} + (R_{rede} + R_{T1}) \frac{di_{BC1}}{dt} + R_{rede} \frac{di_{BC2}}{dt} + \frac{1}{C_{BC1}} i_{BC1} = -(L_{rede} + L_{T1}) \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - (R_{rede} + R_{T1}) \frac{di_{conv}}{dt} - \sqrt{\frac{2}{3}} U w s e n(wt) \quad (5.41)$$

$$(L_{rede} + L_{T2} + L_M) \frac{di_M}{dt} + L_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + (L_{rede} + L_{T2}) \frac{di_{BC2}}{dt} + (R_{rede} + R_{T2} + R_M) i_M + R_{rede} i_{BC1} + (R_{rede} + R_{T2}) i_{BC2} = -L_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - R_{rede} i_{conv} + \sqrt{\frac{2}{3}} U \cos(wt) \quad (5.42)$$

$$(L_{rede} + L_{T2}) \frac{d^2 i_M}{dt^2} + L_{rede} \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + (L_{rede} + L_{T2}) \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} + (R_{rede} + R_{T2}) \frac{di_M}{dt} + R_{rede} \frac{di_{BC1}}{dt} + (R_{rede} + R_{T2}) \frac{di_{BC2}}{dt} + \frac{1}{C_{BC2}} i_{BC2} = -L_{rede} \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - R_{rede} \frac{di_{conv}}{dt} - \sqrt{\frac{2}{3}} U w s e n(wt) \quad (5.43)$$

d) Resolução do sistema de equações

A solução particular das correntes do sistema de equações reduzido será:

$$i_{BC1} = X_{1h} \cos(h\omega t) + X_{2h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.44)$$

$$i_{BC2} = X_{3h} \cos(h\omega t) + X_{4h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.45)$$

$$i_M = X_{5h} \cos(h\omega t) + X_{6h} \text{sen}(h\omega t) \quad (5.46)$$

onde X_{1h} , X_{2h} , ..., X_{6h} são os coeficientes a serem determinados para a obtenção da solução particular das correntes dos bancos de capacitores.

Utilizando ferramentas matemáticas, chegamos a uma matriz de ordem 6 para cada um dos harmônicos existentes no sistema:

$$\begin{vmatrix}
 -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} & \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T1})] & (h\omega)(R_{rede} + R_{T1}) & -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} \\
 -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} & -(h\omega)(R_{rede} + R_{T1}) & \frac{1}{C_{BC1}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T1})] & -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} \\
 (R_{rede} + R_{T2} + R_M) & h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) & R_{rede} & h\omega L_M & (R_{rede} + R_{T2}) & h\omega(L_{rede} + L_{T2}) \\
 -h\omega(L_{rede} + L_{T2} + L_M) & (R_{rede} + R_{T2} + R_M) & -h\omega L_M & R_{rede} & -h\omega(L_{rede} + L_{T2}) & (R_{rede} + R_{T2}) \\
 -(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2}) & (h\omega)(R_{rede} + R_{T2}) & -(h\omega)^2 L_{rede} & h\omega R_{rede} & \frac{1}{C_{BC2}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2})] & (h\omega)(R_{rede} + R_{T2}) \\
 -(h\omega)(R_{rede} + R_{T1}) & -(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2}) & -h\omega R_{rede} & -(h\omega)^2 L_{rede} & -(h\omega)(R_{rede} + R_{T2}) & \frac{1}{C_{BC2}} - [(h\omega)^2 (L_{rede} + L_{T2})]
 \end{vmatrix}
 \begin{vmatrix}
 X_{1h} \\
 X_{2h} \\
 X_{3h} \\
 X_{4h} \\
 X_{5h} \\
 X_{6h}
 \end{vmatrix}
 =
 \begin{vmatrix}
 A_{1h} \\
 A_{2h} \\
 A_{3h} \\
 A_{4h} \\
 A_{5h} \\
 A_{6h}
 \end{vmatrix}$$

onde $A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{6n}$ são os coeficientes dos senos e cossenos das funções conhecidas do sistema de equações.

d) Correntes do banco de capacitores

A corrente do banco de capacitores será desenvolvida como uma serie de Fourier em função dos harmônicos presentes

$$\begin{aligned} i_{BC1} = & a_1 \cos(\omega t + \phi_1) - a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ & - a_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + a_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13}) \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$\begin{aligned} i_{BC2} = & a_1 \cos(\omega t + \phi_1) - a_5 \cos(5\omega t + \phi_5) + a_7 \cos(7\omega t + \phi_7) \\ & - a_{11} \cos(11\omega t + \phi_{11}) + a_{13} \cos(13\omega t + \phi_{13}) \end{aligned} \quad (5.48)$$

e) Tensão no barramento dos banco de capacitores

$$u_{BC1} = i_{BC1} * X_{BC1} \quad (5.49)$$

$$u_{BC2} = i_{BC2} * X_{BC2} \quad (5.50)$$

5.6 - Considerações Finais

Neste capítulo, foi desenvolvida a metodologia para cada alternativa de localização de banco de capacitores apresentada no capítulo 4. Este método determinou um circuito equivalente, assim como os sistemas de equações diferenciais que representam o comportamento do mesmo. De posse disto pode-se obter o comportamento das tensões para cada caso apresentado, como será visto no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

6.1 - Considerações Iniciais

A metodologia e os equacionamentos resultantes para cada caso, mostrados no capítulo anterior, serão aqui utilizados para o cálculo do comportamento das tensões.

Neste capítulo, também será verificada a validade do método desenvolvido através de dois casos:

- Ligação de um indutor em série com o banco de capacitores conectado no secundário do transformador 1 (caso IV).
- Cálculo da ressonância utilizando o método de determinação do comportamento da impedância harmônica.

Para obtenção dos parâmetros dos circuitos equivalentes a partir dos dados do diagrama unifilar, Anexo A, foram usadas as seguintes equações:

a) Impedância equivalente da rede de suprimento de energia

$$Z_{rede} = \frac{U^2}{S_{cc}} \quad (6.1)$$

conforme Spitta (1971), temos:

$$X_{rede} = 0.995 * Z_{rede} \quad \therefore \quad L_{rede} = \frac{X_{rede}}{2\pi f} \quad (6.2)$$

$$R_{rede} = \sqrt{Z_{rede}^2 - X_{rede}^2} \quad (6.3)$$

b) Impedância equivalente do transformador

$$Z_T = \frac{Z\% * U^2}{100 S_{TN}} \quad (6.4)$$

$$R_T = \frac{R\% * U^2}{100 S_{TN}} \quad (6.5)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad \therefore \quad L_T = \frac{X_T}{2\pi f} \quad (6.6)$$

c) Reatância dos bancos de capacitores

$$X_{BC} = \frac{U_{BC}^2}{Q_{BC}} \quad (6.7)$$

$$C_{BC} = \frac{1}{(2\pi f)X_{BC}} \quad (6.8)$$

d) Impedância dos motores

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} * U_N * \eta\% * \cos \phi} \quad (6.9)$$

$$Z_M = \frac{U_N}{(\sqrt{3} * I_N)} * \left(\frac{U_{1N(T2)}}{U_{2N(T2)}} \right)^2 \quad (6.10)$$

$$R_M = Z_M * \cos \phi \quad (6.11)$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} \quad \therefore \quad L_M = \frac{X_M}{2\pi f} \quad (6.12)$$

Como a resistência do circuito equivalente dos componentes varia com a frequência devido ao efeito pelicular, segundo Kümmel (1971), considerou-se:

$$R_h = \frac{R}{11}(7h + 4) \quad (6.13)$$

6.2 - Casos I: Banco de Capacitores conectado no barramento de Alta Tensão 13,8 kV

a) Diagrama Unifilar

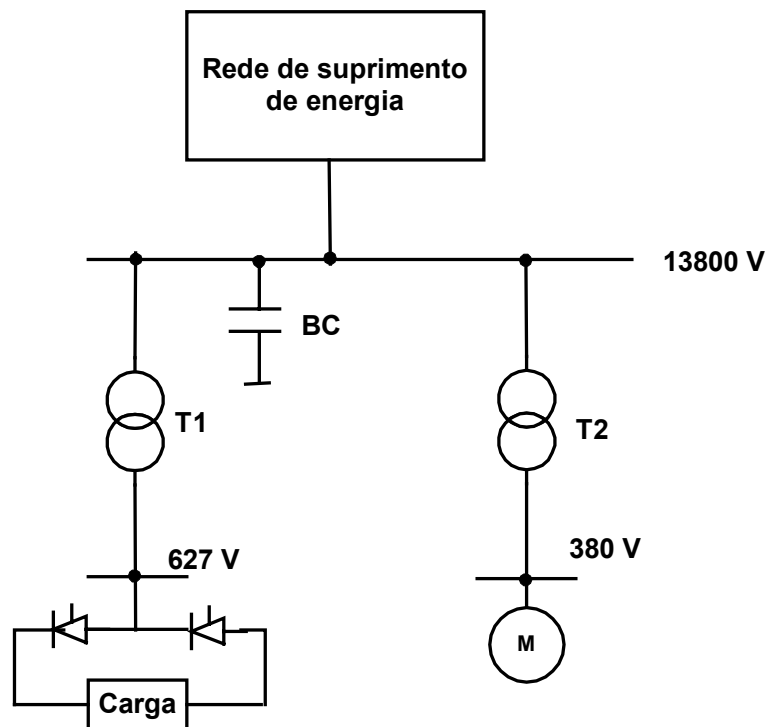


Figura 6.1 - Diagrama Unifilar Caso I

b) Dados técnicos

Rede

$$S_{CC} = 62 \text{ (MVA)}$$

$$U_{1N} = 13800 \text{ (V)}$$

Transformador 1

$$S_{TN} = 1200 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N} = 627 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 5,03\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador 2

$$S_{TN2} = 500 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N2} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N2} = 380 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 4,56\%$$

$$R\% = 25\%$$

Banco de capacitores

$$Q_{BC} = 720 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 15000 \text{ (V)}$$

Motor Equivalente

$$P_M = 305 \text{ (kW)}$$

$$U_M = 380 \text{ (V)}$$

$$\eta\% = 92\%$$

$$\cos\phi = 0,89$$

Conversor AC-DC

$$U_{daN} = 627 \text{ (V)}$$

$$P_d = 700 \text{ (kW)}$$

$$\alpha = 43^\circ$$

$$I_{conv} = \text{(corrente no lado alternado do conversor conforme tabela 2.1)}$$

c) Circuito elétrico equivalente

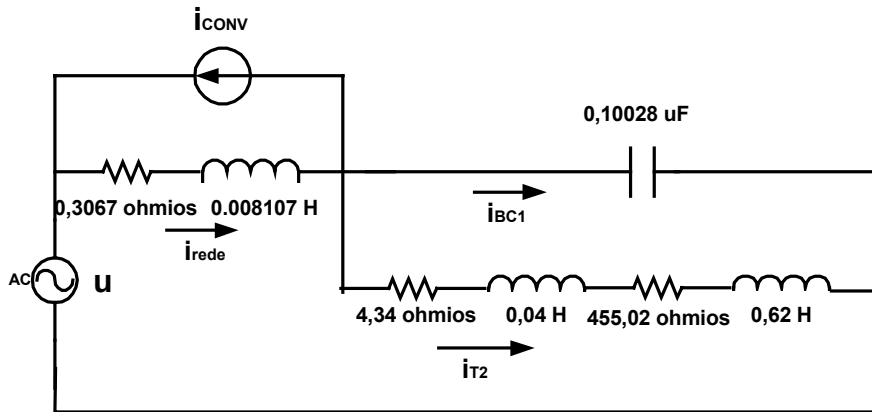


Figura 6.2 - Circuito Equivalente do Caso I

d) Equação diferencial do circuito equivalente

$$0,30677i_{rede} + 0,0081070 \frac{di_{rede}}{dt} + 99714,15082 \int i_{BC1} dt = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.14)$$

$$0,30677i_{rede} + 0,0081070 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,34i_{T2} + 0,0446 \frac{di_{T2}}{dt} + 455,02i_{T2} + 0,62 \frac{di_{T2}}{dt} = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.15)$$

$$i_{rede} = i_{conv} + i_{BC1} + i_{T2} \quad (6.16)$$

onde :

$$i_{conv} = 1145,51 \cos(\omega t + 42,88) - 227,81 \cos(5\omega t + 34,15) + 163,91 \cos(7\omega t + 120,71) - 104,7 \cos(11\omega t + 110,0) + 86,17 \cos(13\omega t + 160,64)$$

Reduzindo o sistema a 2 equações temos:

$$0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + 0,30677 \frac{di_{BC1}}{dt} + 0,30677 \frac{di_{T2}}{dt} + 99714,15082 i_{BC1} = -0,0081070 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 0,30677 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \text{sen}(\omega t) \quad (6.17)$$

$$0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,6711 \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + 0,30677 \frac{di_{BC1}}{dt} + 459,664291 \frac{di_{T2}}{dt} = -0,0081070 \frac{di_{conv}}{dt} - 0,30677 i_{conv} + 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.18)$$

A matriz para cada harmônico será:

Fundamental

98561,970	115,652	-1152,181	115,652	$X_{1(1)}$	39846,366
-115,652	98561,970	-115,652	-1152,181	$X_{2(1)}$	-4202589,171
0,307	3,056	459,664	252,984	$X_{3(1)}$	11147,714
-3,056	0,307	-252,984	459,664	$X_{4(1)}$	105,696

Quinta harmônica

70909,628	2050,199	-28804,523	2050,199	$X_{1(5)}$	-234820,492
-2050,199	70909,628	-2050,199	-28804,523	$X_{2(5)}$	-184926,467
1,088	15,281	1629,719	1264,921	$X_{3(5)}$	98,107
-15,281	1,088	-1264,921	1629,719	$X_{4(5)}$	-124,576

Sétima harmônica

43257,285	3900,635	-56456,866	3900,635	$X_{1(7)}$	-239691,260
-3900,635	43257,285	-3900,635	-56456,866	$X_{2(7)}$	346645,065
1,478	21,394	2214,746	1770,890	$X_{3(7)}$	-131,358
-21,394	1,478	-1770,890	2214,746	$X_{4(7)}$	-90,829

Décima primeira harmônica

-39699,742	9367,832	-139413,893	9367,832	$X_{1(11)}$	268706,655
-9367,832	-39699,742	-9367,832	-139413,893	$X_{2(11)}$	-607969,547
2,259	33,619	3384,801	2782,826	$X_{3(11)}$	146,608
-33,619	2,259	-2782,826	3384,801	$X_{4(11)}$	64,797

Décima terceira harmônica

-95004,426	12984,593	-194718,577	12984,593	$X_{1(13)}$	-736090,633
-12984,593	-95004,426	-12984,593	-194718,577	$X_{2(13)}$	204757,928
2,649	39,731	3969,828	3288,795	$X_{3(13)}$	-41,780
-39,731	2,649	-3288,795	3969,828	$X_{4(13)}$	-150,195

e) Corrente do banco de capacitores

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & -42,4928\text{sen}(wt) - 2,7063\text{sen}(5wt) + 7,2862\text{sen}(7wt) \\
 & + 16,2162\text{sen}(11wt) - 3,21\text{sen}(13wt) + 0,6606\cos(wt) - 3,1898\cos(5wt) \\
 & - 6,2192\cos(7wt) - 2,7479\cos(11wt) + 7,3259\cos(13wt)
 \end{aligned} \tag{6.19}$$

ou ainda :

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & 42,4979\cos(wt - 89,1093) + 4,1832\cos(5wt + 40,3120) \\
 & + 9,5795\cos(7wt - 49,5173) + 16,4474\cos(11wt - 80,38) \\
 & + 8,0019\cos(13wt - 23,72)
 \end{aligned} \tag{6.20}$$

f) Tensão no barramento do banco de capacitores:

$$\begin{aligned}
 u_{BC1} = & 11240,70\cos(wt - 60,56) + 1106,45\cos(5wt - 102,21) \\
 & + 12533,78\cos(7wt - 11,19) + 4350,33\cos(11wt - 41,29) \\
 & + 2116,51\cos(13wt - 164,48)
 \end{aligned} \tag{6.21}$$

Ou na forma fasorial, para tensão de linha:

Tabela 6.1 - Sobretensão Harmônica Caso I

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	13766,99	-60,56
5	1355,12	-102,21
7	3103,24	-11,19
11	5328,04	-41,29
13	2592,18	-164,48

O valor eficaz da tensão no barramento será:

$$U_{BC1(ef)} = 15.365,68 \text{ (V)}$$

6.3 - Caso II: Banco de Capacitores conectado no barramento de Baixa Tensão 627 V

a) Diagrama Unifilar:

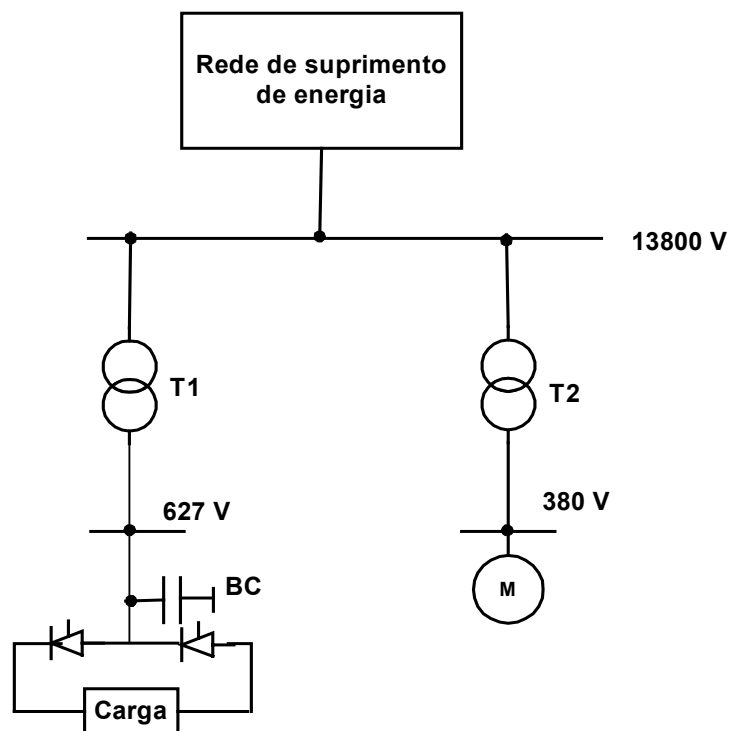


Figura 6.3 - Diagrama Unifilar Caso II

b) Dados técnicos

Rede

$$S_{CC} = 62 \text{ (MVA)}$$

$$U_{IN} = 13800 \text{ (V)}$$

Transformador 1

$$S_{TN} = 1200 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N} = 627 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 5,03\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador 2

$$S_{TN2} = 500 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N2} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N2} = 380 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 4,56\%$$

$$R\% = 25\%$$

Banco de capacitores 1

$$Q_{BC} = 900 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 750 \text{ (V)}$$

Motor Equivalente

$$P_M = 305 \text{ (kW)}$$

$$U_M = 380 \text{ (V)}$$

$$\eta\% = 92\%$$

$$\cos\phi = 0.89$$

Conversor AC-DC

$$U_{d\alpha N} = 627 \text{ (V)}$$

$$P_d = 700 \text{ (kW)}$$

$$\alpha = 43^\circ$$

$$I_{conv} = \text{(corrente no lado alternado do conversor conforme tabela 2.1)}$$

c) Circuito elétrico equivalente

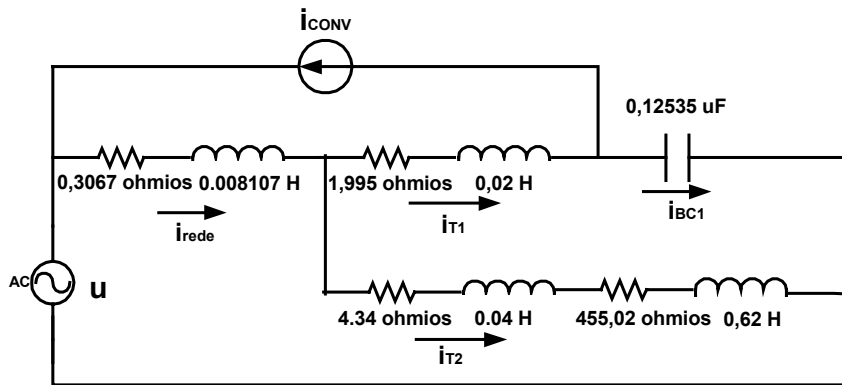


Figura 6.4 - Circuito Equivalente do Caso II

d) Equação diferencial do circuito equivalente

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 1,996i_{T1} + 0,2050L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt} + 79771,321 \int i_{BC1} dt = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.22)$$

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,34i_{T2} + 0,0446 \frac{di_{T2}}{dt} + 455,02i_{T2} + 0,62 \frac{di_{T2}}{dt} = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.23)$$

$$i_{rede} = i_{T1} + i_{T2} \quad (6.24)$$

$$i_{T1} = i_{conv} + i_{BC1} \quad (6.25)$$

onde:

$$i_{conv} = 1145,51 \cos(\omega t + 42,88) - 227,81 \cos(5\omega t + 34,15) + 163,91 \cos(7\omega t + 120,71) - 104,7 \cos(11\omega t + 110,0) + 86,17 \cos(13\omega t + 160,64)$$

Reduzindo o sistema a 2 equações temos:

$$0,0286 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + 2,30243 \frac{di_{BC1}}{dt} + 0,30677 \frac{di_{T2}}{dt} + 79771,32066 i_{BC1} = -0,0286 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 2,30243 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \omega \sin(\omega t) \quad (6.26)$$

$$0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,6711 \frac{d^2 i_{T2}}{dt^2} + 0,30677 \frac{di_{BC1}}{dt} + 459,664291 \frac{di_{T2}}{dt} = -0,0081070 \frac{di_{conv}}{dt} - 0,30677 i_{conv} + 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.27)$$

A matriz para cada harmônico será:

Fundamental

75705,327	867,996	-1152,181	115,652	$X_{1(1)}$	124329,682
-867,996	75705,327	-115,652	-1152,181	$X_{2(1)}$	-4070701,868
0,307	3,056	459,664	252,984	$X_{3(1)}$	11147,714
-3,056	0,307	-252,984	459,664	$X_{4(1)}$	105,696

Quinta harmônica

-21878,526	15387,193	-28804,523	2050,199	$X_{1(5)}$	-781303,869
-15387,193	-21878,526	-2050,199	-28804,523	$X_{2(5)}$	-722426,365
1,088	15,281	1629,719	1264,921	$X_{3(5)}$	98,107
-15,281	1,088	-1264,921	1629,719	$X_{4(5)}$	-124,576

Sétima harmônica

-119462,379	29275,121	-56456,866	3900,635	$X_{1(7)}$	-945166,108
-29275,121	-119462,379	-3900,635	-56456,866	$X_{2(7)}$	1164307,213
1,478	21,394	2214,746	1770,890	$X_{3(7)}$	-131,358
-21,394	1,478	-1770,890	2214,746	$X_{4(7)}$	-90,829

Décima primeira harmônica

-412213,938	70307,636	-139413,893	9367,832	$X_{1(11)}$	1114764,814
-70307,636	-412213,938	-9367,832	-139413,893	$X_{2(11)}$	-2084891,607
2,259	33,619	3384,801	2782,826	$X_{3(11)}$	146,608
-33,619	2,259	-2782,826	3384,801	$X_{4(11)}$	64,797

Décima terceira harmônica

-607381,645	97452,223	-194718,577	12984,593	$X_{1(13)}$	-2664639,534
-97452,223	-607381,645	-12984,593	-194718,577	$X_{2(13)}$	531873,274
2,649	39,731	3969,828	3288,795	$X_{3(13)}$	-41,780
-39,731	2,649	-3288,795	3969,828	$X_{4(13)}$	-150,195

e) Corrente do banco de capacitores

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & -53,5512\text{sen}(wt) + 5,0440\text{sen}(5wt) - 11,0359\text{sen}(7wt) \\
 & + 5,3648\text{sen}(11wt) - 1,5412\text{sen}(13wt) + 2,5257\cos(wt) + 39,4709\cos(5wt) \\
 & + 5,1996\cos(7wt) - 1,788\cos(11wt) + 4,1401\cos(13wt)
 \end{aligned}
 \tag{6.28}$$

ou ainda:

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & 53,6107\cos(wt - 87,29) + 39,7919\cos(5wt + 7,28) \\
 & + 12,1995\cos(7wt - 64,77) + 5,6549\cos(11wt - 71,567) \\
 & + 4,4177\cos(13wt - 20,42)
 \end{aligned}
 \tag{6.29}$$

f) Tensão no barramento do banco de capacitores:

$$\begin{aligned}
 u_{BC1} = & 515,41\cos(wt - 60,52) + 382,56\cos(5wt - 139,52) + 117,29\cos(7wt - 30,56) \\
 & + 54,37\cos(11wt - 36,87) + 42,47\cos(13wt - 165,26)
 \end{aligned}
 \tag{6.30}$$

Ou na forma fasorial, para tensão de linha:

Tabela 6.2 - Sobretensão Harmônica Caso II

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	631,25	-60,52
5	468,54	-139,52
7	143,64	-30,56
11	66,58	-36,87
13	52,02	-165,26

O valor eficaz da tensão no barramento será:

$$U_{BC1(ef)} = 803,60 \text{ (V)}$$

6.4 - Caso III: Banco de Capacitores conectado no barramento de Alta Tensão, 13.8 kV e no barramento do Motor Equivalente.

a) Diagrama Unifilar

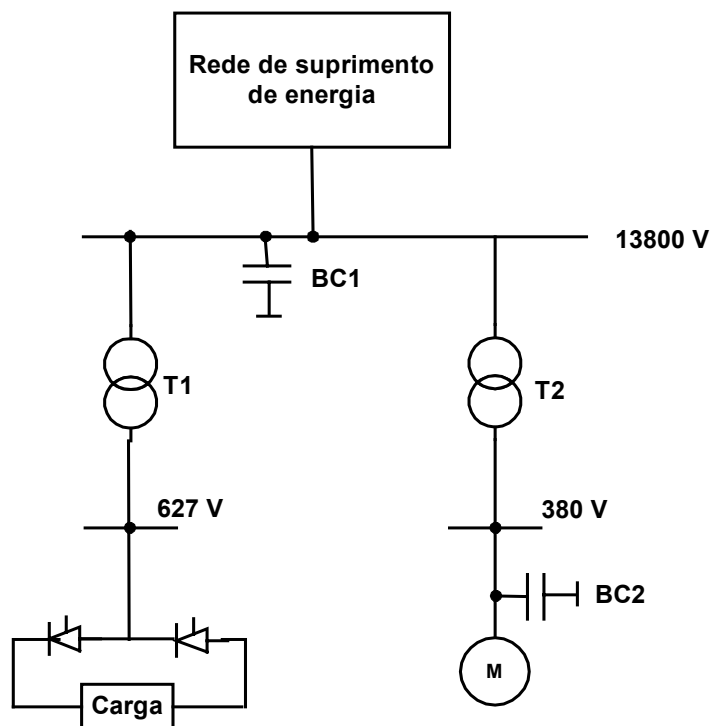


Figura 6.5 - Diagrama Unifilar Caso III

b) Dados técnicos

Rede

$$S_{CC} = 62 \text{ (MVA)}$$

$$U_{1N} = 13800 \text{ (V)}$$

Transformador 1

$$S_{TN1} = 1200 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N1} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N1} = 627 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 5,03\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador 2

$$S_{TN2} = 500 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N2} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N2} = 380 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 4,56\%$$

$$R\% = 25\%$$

Banco de capacitores 1

$$Q_{BC} = 540 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 750 \text{ (V)}$$

Banco de capacitores 2

$$Q_{BC} = 120 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 380 \text{ (V)}$$

Motor Equivalente

$$P_M = 305 \text{ (kW)}$$

$$U_M = 380 \text{ (V)}$$

$$\eta\% = 92\%$$

$$\cos\phi = 0.89$$

Conversor AC-DC

$$U_{d\alpha N} = 627 \text{ (V)}$$

$$P_d = 700 \text{ (kW)}$$

$$\alpha = 43^\circ$$

$$I_{conv} = (\text{corrente no lado alternado do conversor conforme tabela 2.1})$$

c) Circuito elétrico equivalente

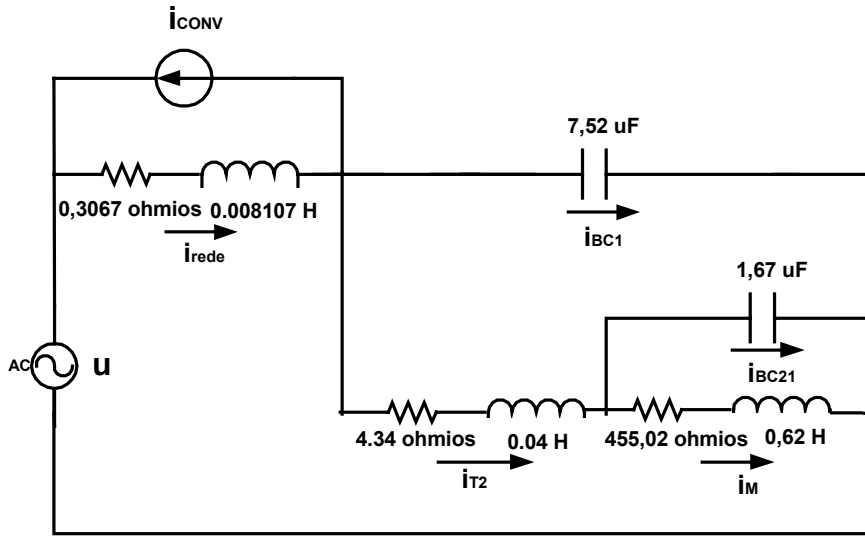


Figura 6.6 - Circuito Equivalente do Caso III

d) Equações diferenciais do circuito equivalente

$$0,3067i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 132952,2 \int i_{BC1} dt = 11267,65 \cos(\omega t) \quad (6.31)$$

$$0,3067i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,342i_{T2} + 0,045 \frac{di_{T2}}{dt} + 455,015i_M + 0,618 \frac{di_M}{dt} = 11267,65 \cos(\omega t) \quad (6.32)$$

$$0,3067i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,342i_{T2} + 0,045 \frac{di_{T2}}{dt} + 598284,904 \int i_{BC2} dt = 11267,65 \cos(\omega t) \quad (6.33)$$

$$i_{rede} = i_{T1} + i_{conv} + i_{BC1} + i_{T2} \quad (6.34)$$

$$i_{T2} = i_M + i_{BC2} \quad (6.35)$$

onde :

$$i_{conv} = 1145,51 \cos(\omega t + 42,88) - 227,81 \cos(5\omega t + 34,15) + 163,91 \cos(7\omega t + 120,71) - 104,7 \cos(11\omega t + 110,0) + 86,17 \cos(13\omega t + 160,64)$$

Neste caso, temos um sistema de 6 equações diferenciais que podem ser reduzidas para 3 equações:

$$\begin{aligned}
 &0,008107 \frac{d^2 i_M}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} \\
 &+ 0,30677 \frac{di_M}{dt} + 0,30677 \frac{di_{BC1}}{dt} + 0,30677 \frac{di_{BC2}}{dt} \\
 &+ 132952,2 i_{BC1} = -0,008107 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 0,30677 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \operatorname{sen}(wt)
 \end{aligned} \tag{6.36}$$

$$\begin{aligned}
 &0,67106 \frac{di_M}{dt} + 0,008107 \frac{di_{BC1}}{dt} + 0,052714 \frac{di_{BC2}}{dt} \\
 &+ 459,665 i_M + 0,30677 i_{BC1} + 4,649 i_{BC2} \\
 &= -0,008107 \frac{di_{conv}}{dt} - 0,30677 i_{conv} + 11267,653 \cos(wt)
 \end{aligned} \tag{6.37}$$

$$\begin{aligned}
 &0,052714 \frac{d^2 i_M}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,052714 \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} \\
 &+ 4,649 \frac{di_M}{dt} + 0,30677 \frac{di_{BC1}}{dt} + 4,649 \frac{di_{BC2}}{dt} + 598284,905 i_{BC2} \\
 &= -0,008107 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 0,30677 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \operatorname{sen}(wt)
 \end{aligned} \tag{6.38}$$

A matriz para cada harmônico será:

Fundamental

-1152,181	115,652	131800,020	115,652	-1152,181	115,652	$X_{1(1)}$	39846,366
-115,652	-1152,181	-115,652	131800,020	-115,652	-1152,181	$X_{2(1)}$	-4202589,171
459,664	252,984	0,307	3,056	4,649	19,873	$X_{3(1)}$	11147,714
-252,984	459,664	-3,056	0,307	-19,873	4,649	$X_{4(1)}$	105,696
-7491,896	1752,560	-1152,181	115,652	590793,009	1752,560	$X_{5(1)}$	39846,366
-1752,560	-7491,896	-115,652	-1152,181	-1752,560	590793,009	$X_{6(1)}$	-4202589,171

Quinta harmônica

-28804,523	2050,199	104147,678	2050,199	-28804,523	2050,199	X ₁₍₅₎	-234820,492
-2050,199	-28804,523	-2050,199	104147,678	-2050,199	-28804,523	X ₂₍₅₎	-184926,467
1629,719	1264,921	1,088	15,281	16,482	99,364	X ₃₍₅₎	98,107
-1264,921	1629,719	-15,281	1,088	-99,364	16,482	X ₄₍₅₎	-124,576
-187297,410	31068,105	-28804,523	2050,199	410987,495	31068,105	X ₅₍₅₎	-234820,492
-31068,105	-187297,410	-2050,199	-28804,523	-31068,105	410987,495	X ₆₍₅₎	-184926,467

Sétima harmônica

-56456,866	3900,635	76495,336	3900,635	-56456,866	3900,635	X ₁₍₇₎	-239691,260
-3900,635	-56456,866	-3900,635	76495,336	-3900,635	-56456,866	X ₂₍₇₎	346645,065
2214,746	1770,890	1,478	21,394	22,399	139,110	X ₃₍₇₎	-131,358
-1770,890	2214,746	-21,394	1,478	-139,110	22,399	X ₄₍₇₎	-90,829
-367102,924	59109,060	-56456,866	3900,635	231181,981	59109,060	X ₅₍₇₎	-239691,260
-59109,060	-367102,924	-3900,635	-56456,866	-59109,060	231181,981	X ₆₍₇₎	346645,065

Décima primeira

-139413,893	9367,832	-6461,691	9367,832	-139413,893	9367,832	X ₁₍₁₁₎	268706,655
-9367,832	-139413,893	-9367,832	-6461,691	-9367,832	-139413,893	X ₂₍₁₁₎	-607969,547
3384,801	2782,826	2,259	33,619	34,232	218,602	X ₃₍₁₁₎	146,608
-2782,826	3384,801	-33,619	2,259	-218,602	34,232	X ₄₍₁₁₎	64,797
-906519,466	141957,339	-139413,893	9367,832	-308234,561	141957,339	X ₅₍₁₁₎	268706,655
-141957,339	-906519,466	-9367,832	-139413,893	-141957,339	-308234,561	X ₆₍₁₁₎	-607969,547

Décima terceira

-194718,577	12984,593	-61766,376	12984,593	-194718,577	12984,593	X ₁₍₁₃₎	-736090,633
-12984,593	-194718,577	-12984,593	-61766,376	-12984,593	-194718,577	X ₂₍₁₃₎	204757,928
3969,828	3288,795	2,649	39,731	40,149	258,347	X ₃₍₁₃₎	-41,780
-3288,795	3969,828	-39,731	2,649	-258,347	40,149	X ₄₍₁₃₎	-150,195
-1266130,494	196764,662	-194718,577	12984,593	-667845,589	196764,662	X ₅₍₁₃₎	-736090,633
-196764,662	-1266130,494	-12984,593	-194718,577	-196764,662	-667845,589	X ₆₍₁₃₎	204757,928

e) Correntes dos bancos de capacitores:

$$\begin{aligned} i_{BC1} = & -31,8362\text{sen}(wt) - 2,0148\text{sen}(5wt) + 5,0658\text{sen}(7wt) - 2,4571\text{sen}(11wt) \\ & - 23,2390\text{sen}(13wt) + 0,4945\cos(wt) - 2,3319\cos(5wt) - 5,4485\cos(7wt) \\ & + 7,1812\cos(11wt) + 3,3382\cos(13wt) \end{aligned} \quad (6.39)$$

$$\begin{aligned} i_{BC2} = & -6,9827\text{sen}(wt) - 0,6467\text{sen}(5wt) + 1,5448\text{sen}(7wt) + 4,2818\text{sen}(11wt) \\ & + 6,0501\text{sen}(13wt) + 0,3028\cos(wt) - 0,6104\cos(5wt) - 2,7303\cos(7wt) \\ & - 2,0742\cos(11wt) + 1,7149\cos(13wt) \end{aligned} \quad (6.40)$$

ou ainda:

$$\begin{aligned} i_{BC1} = & 31,84\cos(wt - 89,11) + 3,08\cos(5wt + 40,83) + 7,44\cos(7wt - 42,92) \\ & + 7,59\cos(11wt - 18,89) + 23,48\cos(13wt - 81,83) \end{aligned} \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} i_{BC2} = & 6,99\cos(wt - 87,52) + 0,89\cos(5wt + 0,0) + 3,14\cos(7wt + 0,0) \\ & + 4,76\cos(11wt + 0,0) + 6,29\cos(13wt + 0,0) \end{aligned} \quad (6.42)$$

f) Tensões no barramento dos bancos de capacitores:

$$\begin{aligned} u_{BC1} = & 11228,92\cos(wt - 179,11) + 1086,83\cos(5wt - 49,17) \\ & + 2623,72\cos(7wt - 132,92) + 2676,71\cos(11wt - 108,89) \\ & + 8279,74\cos(13wt - 171,83) \end{aligned} \quad (6.43)$$

$$\begin{aligned} u_{BC2} = & 305,43\cos(wt - 177,52) + 38,86\cos(5wt - 90,0) \\ & + 137,09\cos(7wt - 90,0) + 207,91\cos(11wt - 90,0) \\ & + 274,81\cos(13wt - 90,0) \end{aligned} \quad (6.44)$$

Ou na forma fasorial, para tensão de linha:

Para o banco de capacitores 1:

Tabela 6.3 - Sobretensão Harmônica Caso III no barramento de 13800 V

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	13752,56	-179,11
5	1331,09	-49,17
7	3213,39	-132,92
11	3278,29	-108,89
13	10140,57	-171,83

Para o banco de capacitores 2:

Tabela 6.4 - Sobretensão Harmônica Caso III no barramento do Motor Equivalente

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	374,07	-177,52
5	47,60	-90,00
7	167,90	-90,00
11	254,64	-90,00
13	336,57	-90,00

O valor eficaz da tensão no barramento será:

$$U_{BC1(ef)} = 17.742,86 \text{ (V)}$$

$$U_{BC2(ef)} = 590,34 \text{ (V)}$$

6.5 - Caso IV: Banco de Capacitores conectado no barramento de Baixa Tensão, 627V e no barramento do Motor Equivalente

a) Diagrama Unifilar

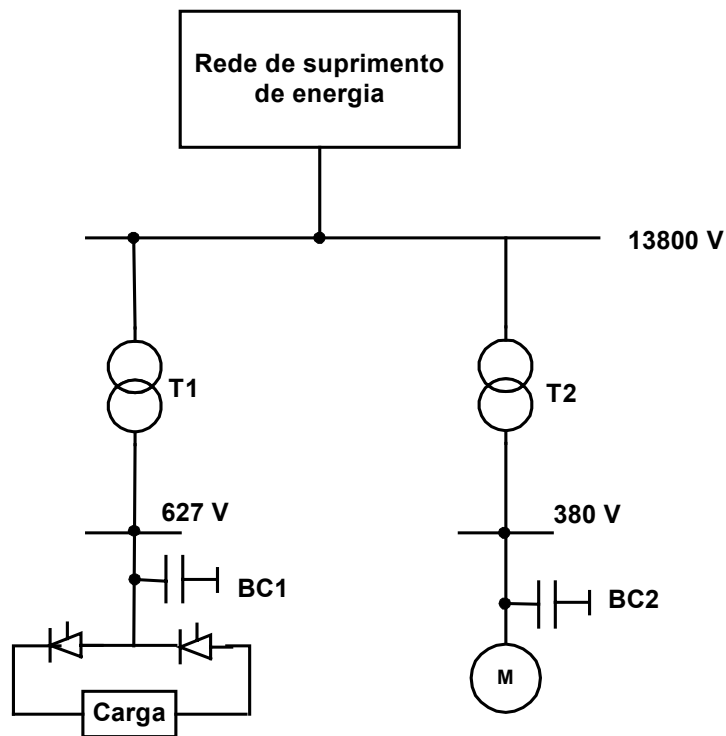


Figura 6.7 - Diagrama Unifilar Caso IV

b) Dados técnicos

Rede

$$S_{CC} = 62 \text{ (MVA)}$$

$$U_{1N} = 13800 \text{ (V)}$$

Transformador 1

$$S_{TN1} = 1200 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N1} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N1} = 627 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 5,03\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador 2

$$S_{TN2} = 500 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N2} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N2} = 380 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 4,56\%$$

$$R\% = 25\%$$

Banco de capacitores 1

$$Q_{BC} = 660 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 750 \text{ (V)}$$

Banco de capacitores 2

$$Q_{BC} = 120 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 380 \text{ (V)}$$

Motor Equivalente

$$P_M = 305 \text{ (kW)}$$

$$U_M = 380 \text{ (V)}$$

$$\eta\% = 92\%$$

$$\cos\varphi = 0,89$$

Conversor AC-DC

$$U_{d\alpha N} = 627 \text{ (V)}$$

$$P_d = 700 \text{ (kW)}$$

$$\alpha = 43^\circ$$

$$I_{conv} = \text{(corrente no lado alternado do conversor conforme tabela 2.1)}$$

c) Circuito elétrico equivalente

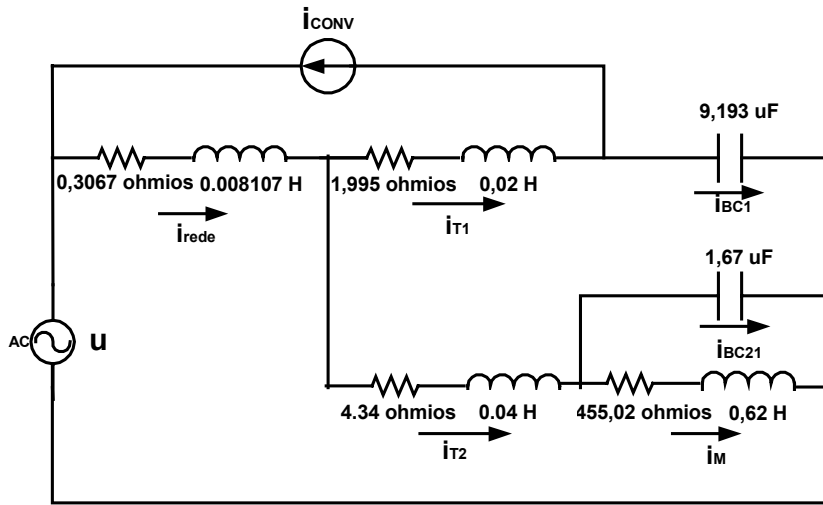


Figura 6.8 - Circuito Equivalente do Caso IV

d) Equações diferenciais do circuito equivalente

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 1,996i_{T1} + 0,021 \frac{di_{T1}}{dt} + 108779,0736 \int i_{BC1} dt = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.45)$$

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,342i_{T2} + 0,045 \frac{di_{T2}}{dt} + 455,02i_M + 0,62 \frac{di_M}{dt} = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.46)$$

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,342i_{T2} + 0,045 \frac{di_{T2}}{dt} + 598284,9049 \int i_{BC2} dt = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.47)$$

$$i_{rede} = i_{T1} + i_{T2} \quad (6.48)$$

$$i_{T1} = i_{conv} + i_{BC1} \quad (6.49)$$

$$i_{T2} = i_M + i_{BC2} \quad (6.50)$$

onde :

$$i_{conv} = 1145,51 \cos(\omega t + 42,88) - 227,81 \cos(5\omega t + 34,15) + 163,91 \cos(7\omega t + 120,71) - 104,7 \cos(11\omega t + 110,0) + 86,17 \cos(13\omega t + 160,64)$$

Neste caso, temos um sistema de 6 equações diferenciais que podem ser reduzidas para 3 equações:

$$\begin{aligned}
 &0,008107 \frac{d^2 i_M}{dt^2} + 0,2861 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} \\
 &+ 0,3067 \frac{di_M}{dt} + 2,302430 \frac{di_{BC1}}{dt} + 0,3067 \frac{di_{BC2}}{dt} + 108779,0736 i_{BC1} \\
 &= -0,2861 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 2,302430 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \operatorname{sen}(wt)
 \end{aligned} \tag{6.51}$$

$$\begin{aligned}
 &0,671062 \frac{di_M}{dt} + 0,052714 \frac{di_{BC2}}{dt} + 0,008107 \frac{di_{BC1}}{dt} \\
 &+ 459,664 i_M + 0,3067 i_{BC1} + 4,6488 i_{BC2} \\
 &= -0,008107 \frac{di_{conv}}{dt} - 0,3067 i_{conv} + 11267,653 \cos(wt)
 \end{aligned} \tag{6.52}$$

$$\begin{aligned}
 &0,052714 \frac{d^2 i_M}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,052714 \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} \\
 &+ 4,6488 \frac{di_M}{dt} + 0,3067 \frac{di_{BC1}}{dt} + 4,6488 \frac{di_{BC2}}{dt} + 598284,9049 i_{BC2} \\
 &= -0,008107 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 0,3067 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \operatorname{sen}(wt)
 \end{aligned} \tag{6.53}$$

A matriz para cada harmônico será:

Fundamental

-1152,181	115,652	104713,080	867,996	-1152,181	115,652	X ₁₍₁₎	124329,682
-115,652	-1152,181	-867,996	104713,080	-115,652	-1152,181	X ₂₍₁₎	-4070701,868
459,664	252,984	0,307	3,056	4,649	19,873	X ₃₍₁₎	11147,714
-252,984	459,664	-3,056	0,307	-19,873	4,649	X ₄₍₁₎	105,696
-7491,896	1752,560	-1152,181	115,652	590793,009	1752,560	X ₅₍₁₎	39846,366
-1752,560	-7491,896	-115,652	-1152,181	-1752,560	590793,009	X ₆₍₁₎	-4202589,171

Quinta harmônica

-28804,523	2050,199	7129,227	15387,193	-28804,523	2050,199	X ₁₍₅₎	-781303,869
-2050,199	-28804,523	-15387,193	7129,227	-2050,199	-28804,523	X ₂₍₅₎	-722426,365
1629,719	1264,921	1,088	15,281	16,482	99,364	X ₃₍₅₎	98,107
-1264,921	1629,719	-15,281	1,088	-99,364	16,482	X ₄₍₅₎	-124,576
-187297,410	31068,105	-28804,523	2050,199	410987,495	31068,105	X ₅₍₅₎	-234820,492
-31068,105	-187297,410	-2050,199	-28804,523	-31068,105	410987,495	X ₆₍₅₎	-184926,467

Sétima harmônica

-56456,866	3900,635	-90454,626	29275,121	-56456,866	3900,635	X ₁₍₇₎	-945166,108
-3900,635	-56456,866	-29275,121	-90454,626	-3900,635	-56456,866	X ₂₍₇₎	1164307,213
2214,746	1770,890	1,478	21,394	22,399	139,110	X ₃₍₇₎	-131,358
-1770,890	2214,746	-21,394	1,478	-139,110	22,399	X ₄₍₇₎	-90,829
-367102,924	59109,060	-56456,866	3900,635	231181,981	59109,060	X ₅₍₇₎	-239691,260
-59109,060	-367102,924	-3900,635	-56456,866	-59109,060	231181,981	X ₆₍₇₎	346645,065

Décima primeira harmônica

-139413,893	9367,832	-383206,186	70307,636	-139413,893	9367,832	X ₁₍₁₁₎	1114764,814
-9367,832	-139413,893	-70307,636	-383206,186	-9367,832	-139413,893	X ₂₍₁₁₎	-2084891,607
3384,801	2782,826	2,259	33,619	34,232	218,602	X ₃₍₁₁₎	146,608
-2782,826	3384,801	-33,619	2,259	-218,602	34,232	X ₄₍₁₁₎	64,797
-906519,466	141957,339	-139413,893	9367,832	-308234,561	141957,339	X ₅₍₁₁₎	268706,655
-141957,339	-906519,466	-9367,832	-139413,893	-141957,339	-308234,561	X ₆₍₁₁₎	-607969,547

Décima terceira harmônica

-194718,577	12984,593	-578373,892	97452,223	-194718,577	12984,593	X ₁₍₁₃₎	-2664639,534
-12984,593	-194718,577	-97452,223	-578373,892	-12984,593	-194718,577	X ₂₍₁₃₎	531873,274
3969,828	3288,795	2,649	39,731	40,149	258,347	X ₃₍₁₃₎	-41,780
-3288,795	3969,828	-39,731	2,649	-258,347	40,149	X ₄₍₁₃₎	-150,195
-1266130,494	196764,662	-194718,577	12984,593	-667845,589	196764,662	X ₅₍₁₃₎	-736090,633
-196764,662	-1266130,494	-12984,593	-194718,577	-196764,662	-667845,589	X ₆₍₁₃₎	204757,928

e) Correntes dos bancos de capacitores

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & -38,7981\text{sen}(wt) - 58,11\text{sen}(5wt) - 13,86\text{sen}(7wt) \\
 & + 5,98\text{sen}(11wt) - 0,0149\text{sen}(13wt) + 1,7161\cos(wt) \\
 & + 25,94\cos(5wt) + 5,32\cos(7wt) - 1,75\cos(11wt) - 3,91\cos(13wt)
 \end{aligned} \tag{6.54}$$

$$\begin{aligned}
 i_{BC2} = & -6,9955\text{sen}(wt) - 3,94\text{sen}(5wt) - 1,358\text{sen}(7wt) \\
 & - 0,599\text{sen}(11wt) - 0,915\text{sen}(13wt) + 0,3068\cos(wt) \\
 & + 1,937\cos(5wt) + 0,865\cos(7wt) - 0,235\cos(11wt) + 2,012\cos(13wt)
 \end{aligned} \tag{6.55}$$

ou ainda:

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & 38,84\cos(wt - 87,47) + 63,64\cos(5wt - 65,94) + 14,85\cos(7wt - 68,99) \\
 & + 6,23\cos(11wt - 73,71) + 3,91\cos(13wt - 0,22)
 \end{aligned} \tag{6.56}$$

$$\begin{aligned}
 i_{BC2} = & 7,00\cos(wt - 87,49) + 4,39\cos(5wt + 0,00) + 1,62\cos(7wt + 0,0) \\
 & + 0,64\cos(11wt + 0,0) + 2,21\cos(13wt + 0,0)
 \end{aligned} \tag{6.57}$$

f) Tensões nos barramentos dos bancos de capacitores

$$\begin{aligned}
 u_{BC1} = & 509,14\cos(wt - 177,47) + 834,31\cos(5wt - 155,94) \\
 & + 194,74\cos(7wt - 158,99) + 81,71\cos(11wt - 163,71) + 51,29\cos(13wt - 89,78)
 \end{aligned} \tag{6.58}$$

$$\begin{aligned}
 u_{BC2} = & 306,00\cos(wt - 177,49) + 191,88\cos(5wt - 90) \\
 & + 70,87\cos(7wt - 90) + 28,15\cos(11wt - 90) + 96,59\cos(13wt - 90)
 \end{aligned} \tag{6.59}$$

Ou na forma fasorial, para tensão de linha:

Para o banco de capacitores 1:

Tabela 6.5 - Sobretensão Harmônica Caso IV no barramento do Conversor

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	623,57	-177,47
5	1021,81	-155,94
7	238,51	-158,99
11	100,08	-163,71
13	62,81	-89,78

Para o banco de capacitores 2:

Tabela 6.6 - Sobretensão Harmônica Caso IV no barramento do Motor Equivalente

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	374,77	-177,49
5	235,00	-90,00
7	86,80	-90,00
11	34,48	-90,00
13	118,30	-90,00

O valor eficaz da tensão no barramento será:

$$U_{BC1(ef)} = 1.226,29 \text{ (V)}$$

$$U_{BC2(ef)} = 467,33 \text{ (V)}$$

Para a comprovação do método do caso IV, foi colocado um indutor em série com o banco de capacitores localizado na barra de alimentação do conversor, a seguir no caso V.

6.6 - Caso V: Banco de Capacitores e Indutor em série conectado no barramento de Baixa Tensão, 627 V e no barramento do Motor Equivalente

a) Diagrama Unifilar

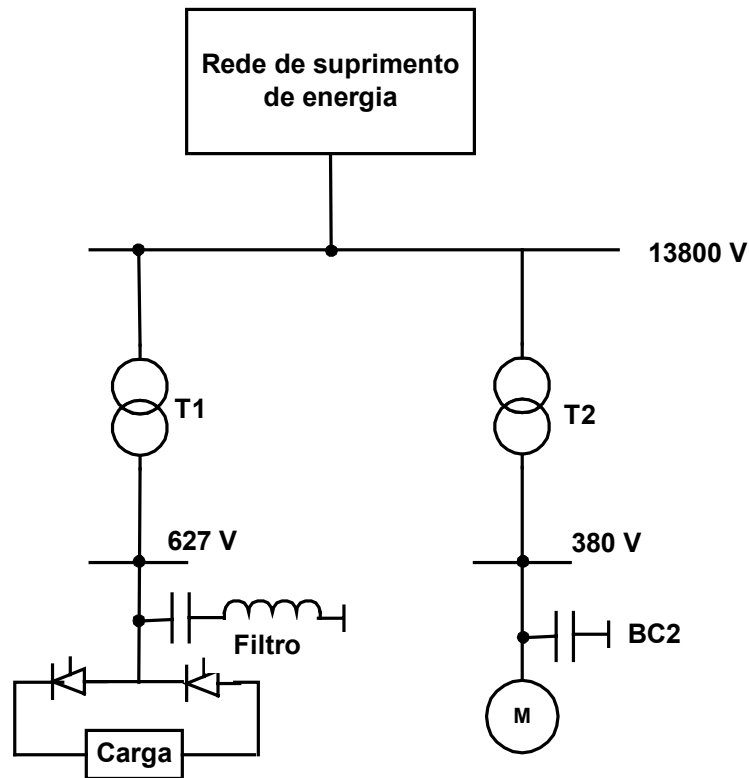


Figura 6.9 - Diagrama Unifilar Caso V

b) Dados técnicos

Rede

$$S_{CC} = 62 \text{ (MVA)}$$

$$U_{1N} = 13800 \text{ (V)}$$

Transformador 1

$$S_{TN1} = 1200 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N1} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N1} = 627 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 5,03\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador 2

$$S_{TN2} = 500 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N2} = 13800 \text{ (V)}$$

$$U_{2N2} = 380 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 4,56\%$$

$$R\% = 25\%$$

Banco de capacitores 1

$$Q_{BC} = 660 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 750 \text{ (V)}$$

Indutor

$$X_{LBC1} = X_{BC1}/(5)^2$$

$$L_{BC1} = X_{LBC1}/2\pi f$$

Banco de capacitores 2

$$Q_{BC} = 120 \text{ (kVAr)}$$

$$U_{BCn} = 380 \text{ (V)}$$

Motor Equivalente

$$P_{MOTOR} = 305 \text{ (kW)}$$

$$U_{MOTOR} = 380 \text{ (V)}$$

$$\eta\% = 92\%$$

$$\cos\phi = 0.89$$

Conversor AC-DC

$$U_{d\alpha N} = 627 \text{ (V)}$$

$$P_d = 700 \text{ (kW)}$$

$$\alpha_N = 43^\circ$$

$$I_{conv} = \text{(corrente no lado alternado do conversor conforme tabela 2.1)}$$

c) Circuito elétrico equivalente

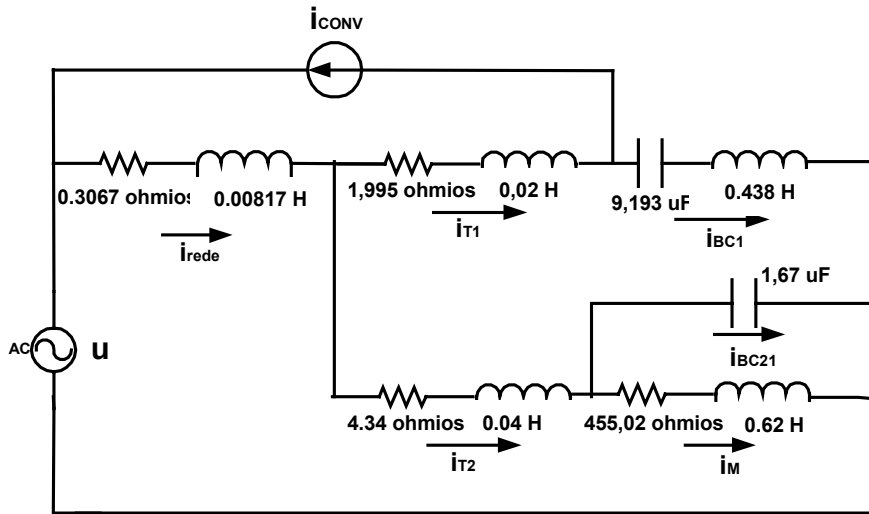


Figura 6.10 - Circuito Equivalente do Caso V

d) Equações diferenciais do circuito equivalente

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 1,996i_{T1} + 0,021 \frac{di_{T1}}{dt} + 108779,0736 \int i_{BC1} dt + 0,04380 \frac{di_{BC1}}{dt} = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.60)$$

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,342i_{T2} + 0,045 \frac{di_{T2}}{dt} + 455,02i_M + 0,62 \frac{di_M}{dt} = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.61)$$

$$0,30677i_{rede} + 0,008107 \frac{di_{rede}}{dt} + 4,342i_{T2} + 0,045 \frac{di_{T2}}{dt} + 598284,9049 \int i_{BC2} dt = 11267,653 \cos(\omega t) \quad (6.62)$$

$$i_{rede} = i_{T1} + i_{T2} \quad (6.63)$$

$$i_{T1} = i_{conv} + i_{BC1} \quad (6.64)$$

$$i_{T2} = i_M + i_{BC2} \quad (6.65)$$

onde:

$$i_{conv} = 1145,51 \cos(\omega t + 42,88) - 227,81 \cos(5\omega t + 34,15) + 163,91 \cos(7\omega t + 120,71) - 104,7 \cos(11\omega t + 110,0) + 86,17 \cos(13\omega t + 160,64)$$

Reduzindo para 3 equações:

$$\begin{aligned}
 &0,008107 \frac{d^2 i_M}{dt^2} + 0,7241 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} \\
 &+ 0,3067 \frac{di_M}{dt} + 2,302430 \frac{di_{BC1}}{dt} + 0,3067 \frac{di_{BC2}}{dt} + 108779,0736 i_{BC1} \\
 &= -0,2861 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 2,302430 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \operatorname{sen}(wt)
 \end{aligned} \tag{6.66}$$

$$\begin{aligned}
 &0,671062 \frac{di_M}{dt} + 0,052714 \frac{di_{BC2}}{dt} + 0,008107 \frac{di_{BC1}}{dt} \\
 &+ 459,664 i_M + 0,3067 i_{BC1} + 4,6488 i_{BC2} \\
 &= -0,008107 \frac{di_{conv}}{dt} - 0,3067 i_{conv} + 11267,653 \cos(wt)
 \end{aligned} \tag{6.67}$$

$$\begin{aligned}
 &0,052714 \frac{d^2 i_M}{dt^2} + 0,008107 \frac{d^2 i_{BC1}}{dt^2} + 0,052714 \frac{d^2 i_{BC2}}{dt^2} \\
 &+ 4,6488 \frac{di_M}{dt} + 0,3067 \frac{di_{BC1}}{dt} + 4,6488 \frac{di_{BC2}}{dt} + 598284,9049 i_{BC2} \\
 &= -0,008107 \frac{d^2 i_{conv}}{dt^2} - 0,3067 \frac{di_{conv}}{dt} - 4247805,037 \operatorname{sen}(wt)
 \end{aligned} \tag{6.68}$$

A matriz para cada harmônico será:

Fundamental

-1152,181	115,652	98487,314	867,996	-1152,181	115,652	$X_{1(1)}$	124329,682
-115,652	-1152,181	-867,996	98487,314	-115,652	-1152,181	$X_{2(1)}$	-4070701,868
459,664	252,984	0,307	3,056	4,649	19,873	$X_{3(1)}$	11147,714
-252,984	459,664	-3,056	0,307	-19,873	4,649	$X_{4(1)}$	105,696
7-7491,896	1752,560	-1152,181	115,652	590793,009	1752,560	$X_{5(1)}$	39846,366
-1752,560	-7491,896	-115,652	-1152,181	-1752,560	590793,009	$X_{6(1)}$	-4202589,171

Quinta harmônica

-28804,523	2050,199	-148514,923	15387,193	-28804,523	2050,199	$X_{1(5)}$	-781303,869
-2050,199	-28804,523	-15387,193	-148514,923	-2050,199	-28804,523	$X_{2(5)}$	-722426,365
1629,719	1264,921	1,088	15,281	16,482	99,364	$X_{3(5)}$	98,107
-1264,921	1629,719	-15,281	1,088	-99,364	16,482	$X_{4(5)}$	-124,576
-187297,410	31068,105	-28804,523	2050,199	410987,495	31068,105	$X_{5(5)}$	-234820,492
-31068,105	-187297,410	-2050,199	-28804,523	-31068,105	410987,495	$X_{6(5)}$	-184926,467

Sétima harmônica

-56456,866	3900,635	-395517,160	29275,121	-56456,866	3900,635	$X_{1(7)}$	-945166,108
-3900,635	-56456,866	-29275,121	-395517,160	-3900,635	-56456,866	$X_{2(7)}$	1164307,213
2214,746	1770,890	1,478	21,394	22,399	139,110	$X_{3(7)}$	-131,358
-1770,890	2214,746	-21,394	1,478	-139,110	22,399	$X_{4(7)}$	-90,829
-367102,924	59109,060	-56456,866	3900,635	231181,981	59109,060	$X_{5(7)}$	-239691,260
-59109,060	-367102,924	-3900,635	-56456,866	-59109,060	231181,981	$X_{6(7)}$	346645,065

Décima primeira harmônica

-139413,893	9367,832	-1136523,870	70307,636	-139413,893	9367,832	$X_{1(11)}$	1114764,814
-9367,832	-139413,893	-70307,636	-1136523,870	-9367,832	-139413,893	$X_{2(11)}$	-2084891,607
3384,801	2782,826	2,259	33,619	34,232	218,602	$X_{3(11)}$	146,608
-2782,826	3384,801	-33,619	2,259	-218,602	34,232	$X_{4(11)}$	64,797
-906519,466	141957,339	-139413,893	9367,832	-308234,561	141957,339	$X_{5(11)}$	268706,655
-141957,339	-906519,466	-9367,832	-139413,893	-141957,339	-308234,561	$X_{6(11)}$	-607969,547

Décima terceira harmônica

-194718,577	12984,593	-1630528,343	97452,223	-194718,577	12984,593	$X_{1(13)}$	-2664639,534
-12984,593	-194718,577	-97452,223	-1630528,343	-12984,593	-194718,577	$X_{2(13)}$	531873,274
3969,828	3288,795	2,649	39,731	40,149	258,347	$X_{3(13)}$	-41,780
-3288,795	3969,828	-39,731	2,649	-258,347	40,149	$X_{4(13)}$	-150,195
-1266130,494	196764,662	-194718,577	12984,593	-667845,589	196764,662	$X_{5(13)}$	-736090,633
-196764,662	-1266130,494	-12984,593	-194718,577	-196764,662	-667845,589	$X_{6(13)}$	204757,928

e) Correntes dos bancos de capacitores

$$\begin{aligned}
 i_{BC1} = & 41,025\text{sen}(wt) + 4,3\text{sen}(5wt) - 3,1689\text{sen}(7wt) \\
 & + 1,7455\text{sen}(11wt) - 0,3753\text{sen}(13wt) + 1,0949\cos(wt) \\
 & + 5,73\cos(5wt) + 2,24\cos(7wt) - 0,886\cos(11wt) - 1,54\cos(13wt)
 \end{aligned} \tag{6.69}$$

$$\begin{aligned}
 i_{BC2} = & 6,85\text{sen}(wt) - 0,1341\text{sen}(5wt) + 0,517\text{sen}(7wt) \\
 & + 1,177\text{sen}(11wt) - 0,4137\text{sen}(13wt) + 0,2409\cos(wt) \\
 & - 0,1655\cos(5wt) - 0,5628\cos(7wt) + 0,2238\cos(11wt) + 0,5269\cos(13wt)
 \end{aligned} \tag{6.70}$$

ou ainda:

$$i_{BC1} = 41,12 \cos(\omega t + 88,47) + 7,16 \cos(5\omega t + 36,89) + 3,88 \cos(7\omega t - 54,73) + 1,96 \cos(11\omega t - 63,08) + 1,59 \cos(13\omega t - 13,65) \quad (6.71)$$

$$i_{BC2} = 6,85 \cos(\omega t + 87,99) + 0,21 \cos(5\omega t + 0,0) + 0,76 \cos(7\omega t + 0,0) + 1,20 \cos(11\omega t + 0,0) + 0,67 \cos(13\omega t + 0,0) \quad (6.72)$$

f) Tensão no barramento dos bancos de capacitores

$$u_{BC1} = 539,04 \cos(\omega t - 1,53) + 93,92 \cos(5\omega t - 53,11) + 50,88 \cos(7\omega t - 144,73) + 25,66 \cos(11\omega t - 153,08) + 20,85 \cos(13\omega t - 103,65) \quad (6.73)$$

$$u_{BC2} = 299,54 \cos(\omega t - 2,01) + 9,31 \cos(5\omega t - 90) + 33,41 \cos(7\omega t - 90) + 52,39 \cos(11\omega t - 90) + 29,27 \cos(13\omega t - 90) \quad (6.74)$$

Ou na forma fasorial, para tensão de linha:

Para o banco de capacitores 1:

Tabela 6.7 - Sobretensão Harmônica Caso V no barramento do Conversor

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	660,19	-1,53
5	115,03	-53,11
7	62,32	-144,73
11	31,43	-153,08
13	25,54	-103,65

Para o banco de capacitores 2:

Tabela 6.8 - Sobretensão Harmônica Caso V no barramento do Motor Equivalente

Harmônico	Amplitude (V rms)	Angulo (graus)
1	366,86	-2,01
5	11,40	-90,00
7	40,92	-90,00
11	64,17	-90,00
13	35,85	-90,00

O valor eficaz da tensão no barramento será:

$$U_{BC1(ef)} = 674,25 \text{ (V)}$$

$$U_{BC2(ef)} = 376,56 \text{ (V)}$$

6.7 - Determinação do Comportamento da Impedância Harmônica

A determinação do comportamento da impedância harmônica, do ponto de vista do conversor, conforme é mostrado a seguir, indica o valor máximo de impedância para o quinto harmônico.

Tomando como base o diagrama unifilar mostrado na figura 6.9, obtêm-se o diagrama de impedâncias mostrado na figura 6.11

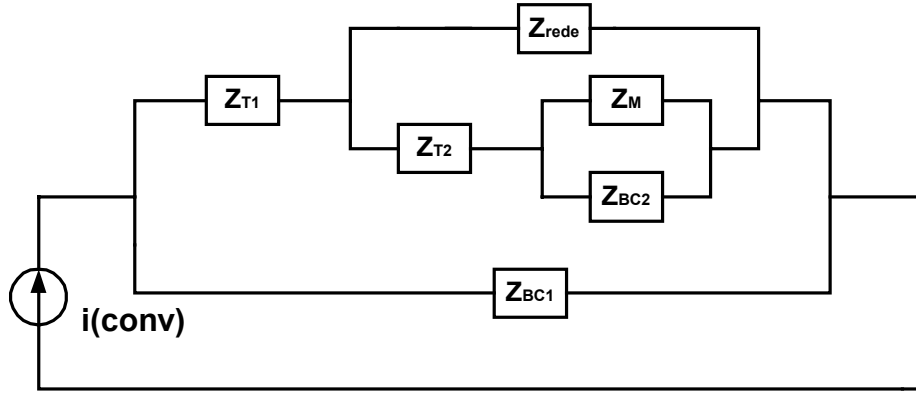


Figura 6.11 - Circuito das Impedâncias

A impedância equivalente é definida pela equação:

$$Z_{equiv} = \frac{(Z_{BC1h} * Z_{T1h})(Z_{Rh} + Z_{T2h})(Z_{Mh} + Z_{BC2h}) + (Z_{BC1h} Z_{T1h} Z_{Mh} Z_{BC2h}) + (Z_{BC1h} Z_{T2h} Z_{Mh} Z_{Rh})}{\left[\begin{aligned} &Z_{T1h} * (Z_{Rh} + Z_{T2h})(Z_{Mh} + Z_{BC2h}) + (Z_{T1h} Z_{Mh} Z_{BC2h}) + (Z_{Rh} Z_{T2h} Z_{Mh}) + (Z_{T2h} Z_{BC2h} Z_{Rh}) \\ &+ (Z_{Rh} Z_{Mh} Z_{BC2h}) + Z_{BC1h} * (Z_{Rh} + Z_{T2h})(Z_{Mh} + Z_{BC2h}) + (Z_{BC1h} Z_{Mh} Z_{BC2h}) \end{aligned} \right]} + \frac{(Z_{BC1h} Z_{T2h} Z_{BC2h} Z_{Rh}) + (Z_{BC1h} Z_{BC2h} Z_{Mh} Z_{Rh})}{\left[\begin{aligned} &Z_{T1h} * (Z_{Rh} + Z_{T2h})(Z_{Mh} + Z_{BC2h}) + (Z_{T1h} Z_{Mh} Z_{BC2h}) + (Z_{Rh} Z_{T2h} Z_{Mh}) + (Z_{T2h} Z_{BC2h} Z_{Rh}) \\ &+ (Z_{Rh} Z_{Mh} Z_{BC2h}) + Z_{BC1h} * (Z_{Rh} + Z_{T2h})(Z_{Mh} + Z_{BC2h}) + (Z_{BC1h} Z_{Mh} Z_{BC2h}) \end{aligned} \right]} \quad (6.75)$$

onde :

$$Z_{T1h} = R_{T1h} + jhX_{T1}$$

$$Z_{T1h} = R_{T1h} + jhX_{T1}$$

$$Z_{T2h} = R_{T2h} + jhX_{T2}$$

$$Z_{Mh} = R_{Mh} + jhX_M$$

$$Z_{BC1h} = \frac{-jX_{BC1}}{h}$$

$$Z_{BC2h} = \frac{-jX_{BC2}}{h}$$

A figura 6.12 mostra o comportamento da impedância em função da frequência comprovando a ressonância para o quinto harmônico, o que confirma a ocorrência da sobretensão para este harmônico.

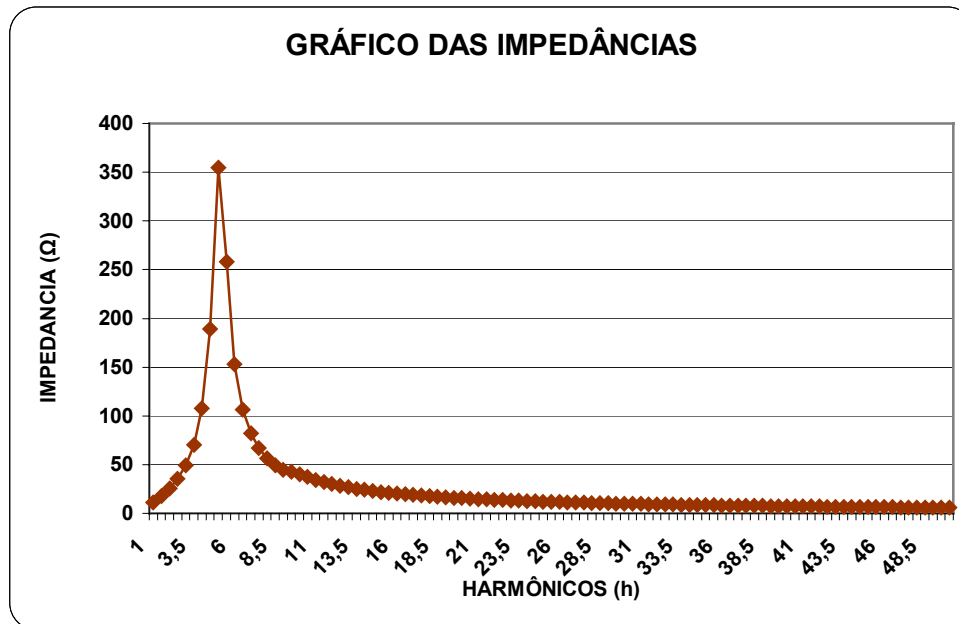


Figura 6.12 - Gráfico das Impedâncias

6.8 - Considerações Finais

Para cada caso equacionado no capítulo anterior junto com os dados da planta elétrica, cujo diagrama unifilar se encontra no apêndice A, foram obtidas as sobretensões nos barramentos.

Esta metodologia foi validada tomando o caso IV, através de duas situações particulares:

- Instalação de um indutor em série com o banco de capacitores, constituindo um filtro para o harmônico responsável pela sobretensão. Onde se verificou a redução da sobretensão.

- Cálculo do comportamento da impedância harmônica do sistema a partir do conversor CA/CC admitido como fonte de corrente. Onde se verificou a ocorrência de ressonância para o mesmo harmônico definido pela metodologia desenvolvida.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

A grande contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que permite, a verificação de ressonância indicativa de sobretensões em um sistema com cargas não – lineares, no qual o fator de potência é corrigido através de conexão de bancos de capacitores, e permite também a determinação dos valores das sobretensões nas diversas barras do sistema.

O método desenvolvido neste trabalho, no qual o comportamento do sistema é obtido através da solução de n equações diferenciais representativas do circuito equivalente do mesmo no domínio do tempo, limitou-se ao regime permanente, como é usual neste tipo de análise. Porém, fica aberta a possibilidade da realização da análise em regime transitório, ou seja, a determinação do comportamento do sistema no chaveamento dos bancos de capacitores.

Convém observar que, inicialmente, o método foi desenvolvido para sistemas de pequeno porte, ficando aqui a sugestão para que o mesmo possa ser ampliado para sistemas maiores.

É importante ainda acrescentar que se levou em conta a variação das resistências com o efeito pelicular dos circuitos equivalentes aos componentes do sistema, porém as indutâncias foram admitidas constantes, como é usual neste tipo de análise.

O efeito da representação da carga não – linear, como fonte de corrente constante e independente do comportamento da sua tensão de alimentação, também deve ser avaliada em um próximo trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ARRILLAGA J., BRADLEY D.A., BODGER P.S., **Power System Harmonic**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potencia**. Florianópolis, 2000.

CURRENCE, Evan J. PLIZGA, John. E. HOARD, Nelson N. **Harmonic Resonance at Medium Sized Industrial Plant**. IEEE, TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 31 No. 4, Julho-Agosto.1995. Pg. 682-690.

KÜMMEL, Fritz, **Elektrische Antriebstechnik**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1971. Pag. 177.

LEMIEUX, Guy. **Power System Harmonic Resonance -A Documented Case**. IEEE, TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 26 No. 3, Maio-Junho.1990. Pg. 483-488.

SÁ Cortez de, Adriana. **Uma Contribuição para o Estudo de Transformadores para Conversores**. 2002. Tese (Mestrado em Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá. Pg. 53-54.

SPITTA, Albert F. **Elektrische Installations technik**. Madrid: Siemens Aktiengesellschaft, 1978. Pag. 54

ANEXO A

DIAGRAMA UNIFILAR

A Figura mostra o diagrama unifilar da indústria.

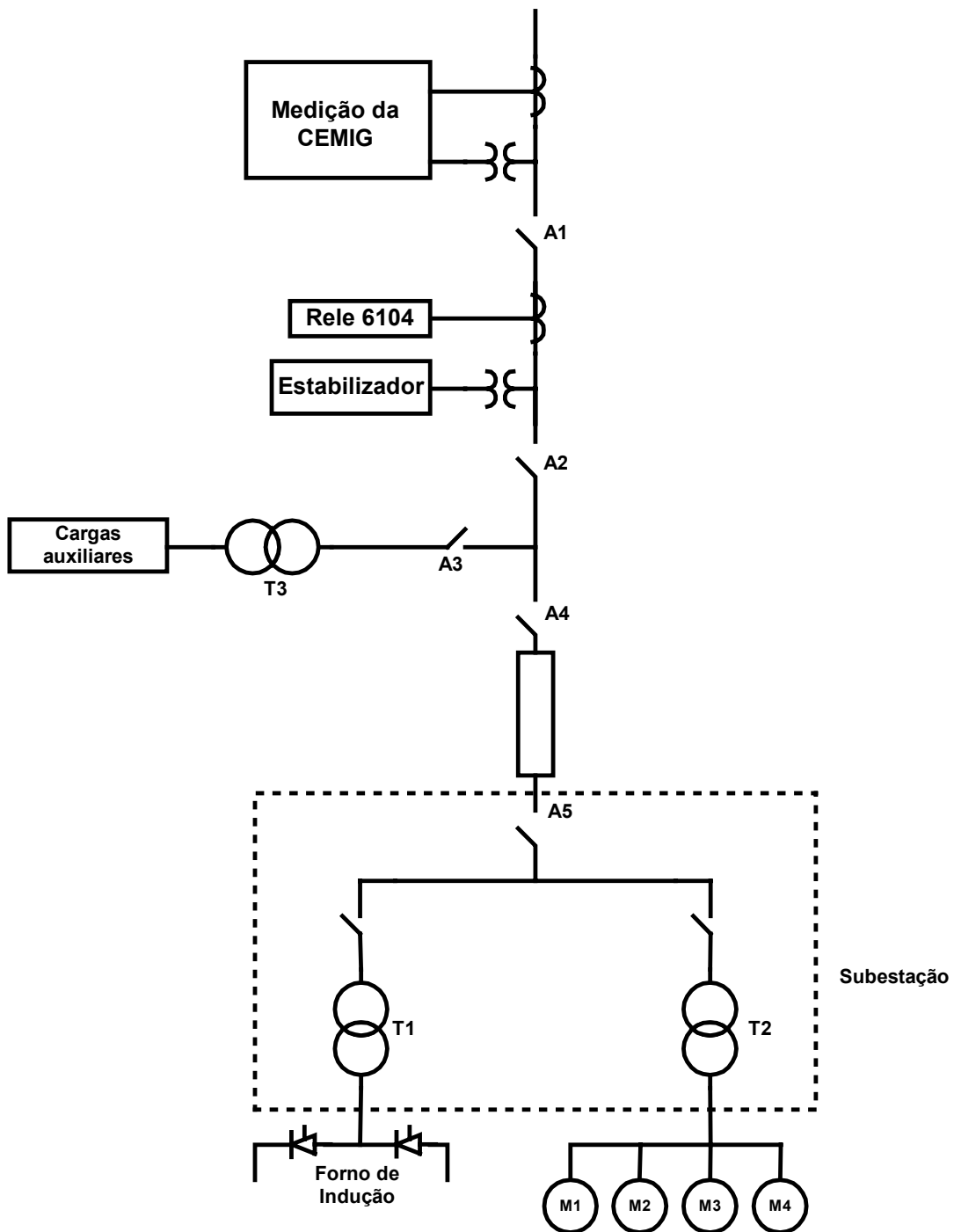


Figura A.1 - Diagrama Unifilar da Indústria

Na figura A.1 tem-se:

A1	Seccionador a vazio
A2	Disjuntor
A3	Seccionador a vazio
A4	Seccionador a vazio
A5	Seccionador a vazio
T1	Transformador do forno
T2	Transformador que alimenta os motores
T3	Transformador auxiliar
M1	Compressor
M2	Prensa
M3	Prensa
M4	Compressor

DADOS TÉCNICOS

Os equipamentos mostrados na figura A.1 têm os seguintes dados técnicos:

Disjuntor A2

$$S_{CC} = 350 \text{ (MVA)}$$

$$U_N = 15 \text{ (kV)}$$

$$I_N = 630 \text{ (A)}$$

Transformador T1

$$S_{TN} = 1200 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N} = 13.8 \text{ (kV)}$$

$$U_{2N} = 627 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 5.03\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador T2

$$S_{TN} = 500 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N} = 13.8 \text{ (kV)}$$

$$U_{2N} = 380/220 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 4.56\%$$

$$R\% = 25\%$$

Transformador T3

$$S_{TN} = 75 \text{ (kVA)}$$

$$U_{1N} = 13.8 \text{ (kV)}$$

$$U_{2N} = 220/127 \text{ (V)}$$

$$Z\% = 3.75\%$$

Motor M1

$$P_N = 75 \text{ (kW)}$$

$$U_N = 380 \text{ (V)}$$

$$I_N = 135 \text{ (A)}$$

Motor M2

$$P_N = 130 \text{ (kW)}$$

$$U_N = 380 \text{ (V)}$$

$$I_N = 255 \text{ (A)}$$

Motor M3

$$P_N = 25 \text{ (kW)}$$

$$U_N = 380 \text{ (V)}$$

$$I_N = 47.5 \text{ (A)}$$

Motor M4

$$P_N = 75 \text{ (kW)}$$

$$U_N = 380 \text{ (V)}$$

$$I_N = 140 \text{ (A)}$$

Conversor AC-DC

$$U_{d\alpha N} = 627 \text{ (V)}$$

$$P_d = 700 \text{ (kW)}$$

$$\alpha = 43^\circ$$