

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Clider Adriane de
Sousa Silva e aprovada pela Comissão
Julgadora em 12/11/93.

Francisca
Orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA
(D. S. C. E.)

**PREVISÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA,
UTILIZANDO-SE MATRIZ IMPEDÂNCIA DE
BARRA HARMÔNICA**

Autor: CLIDER ADRIANE DE SOUSA SILVA $\pi \approx 8$

Orientadora: FRANCISCA APARECIDA DE CAMARGO PIRES

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, como parte
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de:
Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, novembro de 1993

*Dedico este trabalho a todos que se
dedicam e contribuem para o
desenvolvimento da pesquisa.*

*"Mil comprovações não valem uma
contra-prova"*

Galileo

AGRADECIMENTOS

- À Prof. Dra. Francisca Aparecida de Camargo Pires, pela orientação segura e por todos os ensinamentos que me proporcionou, e acima de tudo pelo companheirismo e amizade sinceros;

- Ao companheiro Dionízio por ter me apresentado à professora Francisca que viria a se tornar minha orientadora;

- Aos amigos e colegas da FEE: Edson Pinheiro, Sérgio Gouvêa, João Carlos, Gustavo, Ari, Plínio, Alencar, Tânia, Gelson, Valfredo, Carla, Mangili, pelos preciosos momentos que compartilhamos;

- Ao CEFET-PR, em especial ao Departamento de Eletrotécnica e à Divisão de Pesquisa e Produção, que proporcionaram a oportunidade de concluir este trabalho;

- Aos meus familiares, pelo apoio sempre constante;

- À Deus, pela perseverança.

SUMÁRIO

Resumo.....	v
1- INTRODUÇÃO.....	1
2 - DISTORÇÕES PERIÓDICAS E FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Harmônicas em Sistemas Trifásicos.....	4
2.3 Efeitos Causados por Distorções Harmônicas.....	5
2.4 Limites para Níveis Harmônicos.....	10
2.5 - Métodos Computacionais para Previsão de Distorções Harmônicas (O Estado da Arte).....	12
2.6 - Proposta do Trabalho.....	18
3 - PRINCIPAIS FONTES HARMÔNICAS.....	20
3.1 Introdução.....	20
3.2 Conversores Estáticos.....	22
3.2.1 Harmônicas Características.....	29
4 - MODELOS DE COMPONENTES.....	37
4.1 Introdução.....	37
4.2 Modelos de Componentes.....	40
5 - MÉTODO PROPOSTO: IMPLEMENTAÇÃO, SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....	49
5.1 Introdução.....	49
5.2 Método Proposto.....	49
5.2.1 Filosofia de Análise para Várias Fontes Harmônicas.....	53
5.3 Implementação do Método Proposto.....	54
5.4 Estrutura do Programa Computacional.....	56
5.5 Sistema Simulado.....	59
5.5.1 Considerações para Desenvolvimento.....	60
5.6 Resultados Obtidos.....	62
5.6.1 Instalação de Filtros na Barra do Conversor.....	64
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
APÊNDICE.....	73

RESUMO

O presente trabalho é uma contribuição ao estudo de harmônicas em sistemas de energia elétrica. Apresenta um enfoque voltado para a área de planejamento, no sentido de avaliar de maneira qualitativa as possíveis situações de distorções harmônicas de tensão que possam ocorrer quando da instalação de cargas elétricas com comportamentos não-lineares em um sistema de energia elétrica.

Utilizando o domínio da frequência, bem como um tratamento monofásico, pretende-se apresentar um método computacional de processamento simples e rápido a ser utilizado para avaliação destas distorções harmônicas de tensão em sistemas elétricos.

Sua característica principal está na metodologia empregada para o tratamento das injeções harmônicas por parte de cargas não-lineares, que permite fornecer um prévio diagnóstico do comportamento do sistema, diante da presença de tais cargas, antes mesmo da sua efetiva instalação.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A presença de cargas não-lineares em um sistema de energia elétrica acarreta, de um modo geral, distorções nas formas de onda de tensões e/ou correntes deste sistema. Tais distorções devem permanecer dentro de certos limites para o bom desempenho dos sistemas elétricos de potência, sendo estas distorções motivo de grande preocupação por parte das concessionárias e dos consumidores.

A eliminação ou minimização da presença destas distorções de tensões e/ou correntes é objeto de estudo, uma vez que a presença de harmônicas em sistemas de energia elétrica deve ser encarada como prejudicial, por ser causadora de dispêndios financeiros desnecessários para concessionárias e usuários, sendo responsável por perdas ôhmicas, solicitações anormais de isolamento e operação indevida de diversos equipamentos.

Objetivando contribuir com esta recente e abrangente área da engenharia elétrica, este trabalho procura apresentar uma metodologia de previsão da presença de distorções harmônicas em sistemas elétricos de energia elétrica, através da simulação do seu comportamento mediante a instalação de cargas não-lineares em determinadas barras deste sistema.

Esta metodologia baseia-se apenas na topologia do sistema e não pretende concorrer, principalmente em exatidão, com métodos recentemente propostos^{[13],[14],[15]}, nos quais o detalhamento da operação da(s) carga(s) não-linear(es) bem como a possibilidade da escolha de diferentes modelos para cada um dos componentes físicos dos sistemas, têm grande influência na avaliação das distorções harmônicas.

O método proposto pretende ser apenas um recurso de fácil aplicação, sobretudo em concessionárias de energia elétrica, fornecendo um pré-diagnóstico sobre níveis de distorções harmônicas de tensão devido a presença de cargas não-lineares no sistema. Neste sentido, esta é mais uma ferramenta computacional que poderia ser utilizada pelos setores de planejamento das concessionárias, e em especial no atendimento de consumidores industriais.

O trabalho apresenta-se desenvolvido em capítulos de acordo com a estrutura mencionada a seguir:

O Capítulo 2 apresenta um panorama global das harmônicas em sistemas de energia elétrica, onde são enfatizados efeitos, bem como o estado da arte dos estudos computacionais pertinentes.

No Capítulo 3 é feita uma abordagem das principais fontes geradoras de frequências harmônicas para os sistemas de energia elétrica.

Os modelos adotados representativos dos componentes do sistema para a implementação do método proposto neste trabalho são apresentados no Capítulo 4.

O método proposto, bem como os resultados obtidos nos exemplos simulados encontram-se no Capítulo 5.

Finalmente, as conclusões e sugestões deste trabalho são encontradas no Capítulo 6.

CAPÍTULO 2

DISTORÇÕES PERIÓDICAS E FREQUÊNCIAS HARMÔNICAS

2.1 - INTRODUÇÃO

Idealmente, poder-se-ia considerar os sistemas de energia elétrica como lineares, ou seja, sistemas nos quais as formas de onda das tensões e das correntes presentes fossem puramente senoidais. No entanto, esta idealização está cada vez mais distante da realidade, devido a presença de equipamentos com características não-lineares.

Equipamentos que apresentam comportamentos não-lineares causam distorções nas formas de onda das tensões e/ou correntes, sendo que a maior parte destas distorções não interfere na frequência nominal do sistema, podendo ser facilmente decompostas através da Análise de Fourier em frequências denominadas frequências harmônicas, baseando-se no fato de que estas distorções apresentam uma característica periódica.

Partindo-se de tensões senoidais equilibradas pode-se prever, a princípio, quais as ordens harmônicas que devem ser geradas pelas principais fontes de distorção. No entanto, estas ordens denominadas características, pelo fato de poderem ser expressas através de uma lei de formação que depende do comportamento da fonte geradora, são determinadas em função de uma alimentação idealizada. A alteração desta situação idealizada, pode ocasionar, também, a geração de ordens harmônicas diferentes, denominadas não-características.

No passado, um dos componentes de sistemas elétricos, ao qual mais se atribuía a responsabilidade da geração de harmônicas, era o transformador. A característica não-linear de seu circuito magnético é responsável por uma corrente de magnetização, cuja forma de onda não-senoidal leva à geração de harmônicas ímpares. No entanto, as soluções para minimizar estes efeitos não iam além da configuração delta-estrela para conexão dos transformadores, uma vez que esta configuração permite confinar as harmônicas de ordens múltiplas de três no lado delta.

Após os primeiros relatos de problemas relevantes criados por harmônicas devido a operação de instalações conversoras estáticas e do crescente uso de cargas que se utilizam de componentes eletrônicos, bem como da tendência atual de se trabalhar em pontos próximos da não-linearidade nos materiais ferromagnéticos constituintes de máquinas elétricas,^[1] o estudo mais aprofundado das distorções nas formas de onda de corrente e tensão tem assumido uma grande relevância.

2.2 - HARMÔNICAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Um sistema trifásico pode apresentar distorções de corrente e/ou tensão que podem ser equilibradas ou desequilibradas.

Um sistema trifásico no qual está presente uma distorção equilibrada na corrente, por exemplo, apresenta as formas de onda das correntes distorcidas de maneira idêntica nas três fases, apenas tendo uma defasagem de 120° entre si. Neste caso, a análise de Fourier, resulta genericamente, para as três fases, nas seguintes expressões para as correntes:

$$\begin{aligned} i_a(t) = & I_1 \text{sen}(wt + \varphi_1) + I_2 \text{sen}(2wt + \varphi_2) + I_3 \text{sen}(3wt + \varphi_3) + \\ & + I_4 \text{sen}(4wt + \varphi_4) + I_5 \text{sen}(5wt + \varphi_5) + I_6 \text{sen}(6wt + \varphi_6) + \\ & + I_7 \text{sen}(7wt + \varphi_7) + \dots \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} i_b(t) = & I_1 \text{sen}(wt - 120^\circ + \varphi_1) + I_2 \text{sen}[2(wt - 120^\circ) + \varphi_2] + I_3 \text{sen}[3(wt - 120^\circ) + \varphi_3] + \\ & + I_4 \text{sen}[4(wt - 120^\circ) + \varphi_4] + I_5 \text{sen}[5(wt - 120^\circ) + \varphi_5] + I_6 \text{sen}[6(wt - 120^\circ) + \varphi_6] + \\ & + I_7 \text{sen}[7(wt - 120^\circ) + \varphi_7] + \dots \end{aligned}$$

ou seja:

$$\begin{aligned} i_b(t) = & I_1 \text{sen}(wt - 120^\circ + \varphi_1) + I_2 \text{sen}(2wt + 120^\circ + \varphi_2) + I_3 \text{sen}(3wt + \varphi_3) + \\ & + I_4 \text{sen}(4wt - 120^\circ + \varphi_4) + I_5 \text{sen}(5wt + 120^\circ + \varphi_5) + I_6 \text{sen}(6wt + \varphi_6) + \\ & + I_7 \text{sen}(7wt - 120^\circ + \varphi_7) + \dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$i_c(t) = I_1 \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_1) + I_2 \sin[2(\omega t + 120^\circ) + \varphi_2] + I_3 \sin[3(\omega t + 120^\circ) + \varphi_3] + \\ + I_4 \sin[4(\omega t + 120^\circ) + \varphi_4] + I_5 \sin[5(\omega t + 120^\circ) + \varphi_5] + I_6 \sin[6(\omega t + 120^\circ) + \varphi_6] + \\ + I_7 \sin[7(\omega t + 120^\circ) + \varphi_7] + \dots$$

ou seja:

$$i_c(t) = I_1 \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_1) + I_2 \sin(2\omega t - 120^\circ + \varphi_2) + I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \\ + I_4 \sin(4\omega t + 120^\circ + \varphi_4) + I_5 \sin(5\omega t - 120^\circ + \varphi_5) + I_6 \sin(6\omega t + \varphi_6) + \\ + I_7 \sin(7\omega t + 120^\circ + \varphi_7) + \dots \quad (2.3)$$

Deste modo, se as componentes fundamentais das três fases formam um sistema trifásico de sequência positiva, são também de sequência positiva as componentes de 4ª, 7ª, 10ª,... harmônicas; já as componentes de 2ª, 5ª, 8ª,... harmônicas formam sistemas trifásicos de sequência negativa, ao passo que a 3ª harmônica e suas múltiplas constituem sistemas trifásicos de sequência nula.

Esta disposição de sequência de fases das frequências harmônicas só é válida se a distorção das três fases for idêntica. Isto explica a não contenção da 3ª harmônica e suas múltiplas por ligações delta de transformadores ou reatores.

2.3- EFEITOS CAUSADOS POR DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Em geral, nos sistemas de energia elétrica, o aparecimento de correntes harmônicas decorrem sobretudo da operação de conversores estáticos. Estes equipamentos podem ser convenientemente agrupados em três grandes áreas: [2]

- conversores de potência elevada como os utilizados em indústrias de redução de metais e em transmissões c.c.;
- conversores de médio porte como os utilizados em indústrias de manufatura;
- retificadores de baixa potência como os utilizados em televisores, carregadores de bateria, etc.

Nos atuais sistemas de energia elétrica, a presença de correntes e/ou tensões distorcidas podem causar além da indução de ruído em sistemas de comunicação, de sinalização e de controle, uma série de outros problemas.

Como exemplos, podem ser citados o aumento das perdas nos equipamentos dos sistemas de potência, a redução no rendimento de motores c.a., o aumento da demanda de potência reativa, o aumento da necessidade de investimentos para os sistemas, a redução da qualidade de determinados produtos industriais, o aumento nos custos de manutenção^[3], o possível aumento nas contas de energia elétrica, bem como as falhas de determinados equipamentos sujeitos à sobretensões harmônicas devido à ressonâncias^[4].

De um modo geral, os efeitos decorrentes das distorções harmônicas podem ser divididos em três grandes grupos:

- Solicitação de isolamento, associada a distorções de tensões;
- Solicitação térmica, devido a circulação de correntes harmônicas;
- Operação indevida de diversas naturezas.

Dentre os mais freqüentes, seguem alguns exemplos desses efeitos:

• SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Simultaneamente ao crescimento da utilização de circuitos com cargas em corrente contínua, os sistemas telefônicos e telegráficos se expandiram. Assim, observou-se que, quando as linhas de transmissão que alimentavam os conversores estáticos compartilhavam do mesmo caminho que as linhas de telefonia e telegrafia, fortes ruídos eram induzidos nos sistemas de comunicação. Esta indução pode aparecer também sobre sistemas de sinalização e controle.

• EQUIPAMENTOS DE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

Quando submetido à corrente alternada, um condutor apresenta uma distribuição não uniforme da corrente elétrica em sua seção transversal.

Normalmente, nos condutores cilíndricos, a densidade de corrente aumenta do interior para a superfície externa. Este fenômeno conhecido como efeito pelicular altera substancialmente a impedância do condutor, principalmente para altas frequências, resultando em um aumento das perdas nos equipamentos dos sistemas de potência^[5].

• MÁQUINAS ELÉTRICAS

Um motor de indução, quando alimentado por tensões trifásicas simétricas não-senoidais apresenta correntes de sequência positiva, negativa e nula induzidas no rotor, sendo a corrente fundamental a responsável pela rotação do rotor.

A influência das componentes harmônicas é prejudicial ao movimento deste rotor, uma vez que, o aparecimento de torques oscilatórios devido à interação de correntes harmônicas e o campo magnético de frequência fundamental pode levar a problemas de vibração mecânica para o motor e a carga acionada^[6]. Além disso, apesar destas harmônicas possuírem pequena amplitude, a resistência elétrica para cada uma destas frequências é bastante elevada devido ao efeito pelicular, contribuindo para um aumento nas perdas do motor.

As máquinas síncronas se mostram mais sensíveis a tensões distorcidas do que as máquinas de indução. A presença de tensões distorcidas no estator provoca a indução de correntes harmônicas no rotor, que é projetado para suportar correntes alternadas de frequência fundamental somente na partida.

• TRANSFORMADORES

Os efeitos das harmônicas nos transformadores podem ser classificados em:

- a) Aumento das perdas no cobre e perdas ocasionadas por fluxos de dispersão.
- b) Maiores solicitações do isolamento e possíveis ressonâncias entre os enrolamentos do transformador e as capacitâncias das linhas.
- c) A existência de componente contínua de corrente devido à operação assimétrica dos conversores leva o transformador a uma magnetização assimétrica e seus subseqüentes efeitos ^[6,7].

• EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO

Disjuntores equipados com bobinas de desarme, quando sujeitos a sobreaquecimento, perdem a calibração do desarme dos dispositivos térmicos que o constituem. Com isto, o mecanismo de desarme será mais sensível às correntes harmônicas do que a calibração à frequência fundamental ^[8].

• CAPACITORES E ISOLADORES

Na presença de distorções harmônicas, em função da defasagem angular entre a fundamental e suas ordens harmônicas, os picos das diferentes frequências podem ser coincidentes ou não, o que resulta em uma tensão de pico de acordo com esta combinação ^[9].

Este resultado é especialmente importante quando se dimensiona elementos sensíveis a picos de tensão, como é o caso de isoladores e capacitores. Especificamente no caso dos isoladores, distorções excessivas de tensões e/ou correntes, aliadas a outros fatores tais como condições ambientais, podem comprometer as características do material que constitui o equipamento, chegando a ocasionar o surgimento de "flashover".

• MEDIDORES DE ENERGIA

Medidores de energia que funcionam segundo o princípio da indução, são projetados, testados e ajustados para serem usados em circuitos c.a. nos quais tensões e correntes sejam essencialmente senoidais. Supondo-se que a forma de onda da tensão seja senoidal, o erro do medidor devido à distorção da forma de onda da corrente é uma função da magnitude da corrente da carga e do grau de distorção^[10].

Na presença de correntes distorcidas, que se apresentam com intervalos de valores nulos, os erros nos medidores analógicos de energia podem vir a aumentar caso aumente o valor eficaz da corrente que passa pelo medidor e com a elevação dos intervalos que apresentam valor nulo.

• CARGAS RL

Uma parcela significativa das cargas de um sistema de energia elétrica é constituída de resistências passivas ou pela combinação de arranjos RL. Como exemplos de cargas desta natureza tem-se as lâmpadas incandescentes.

O acréscimo da potência causado pela distorção de tensão reflete diretamente na vida útil destes tipos de carga.

• SITUAÇÕES DE RESSONÂNCIA

Além dos problemas relacionados diretamente com o efeito das distorções sobre os componentes do sistema, existe ainda o fenômeno físico da ressonância que, em função da topologia do sistema, pode apresentar, para determinadas frequências harmônicas, situações equivalentes de curto-circuito ou de circuito aberto, sujeitando os equipamentos a correntes ou tensões elevadas, para as frequências ressonantes^[11].

O fenômeno da ressonância tem sido considerado com maior ênfase em relação a capacitores e em particular capacitores para correção de fator de potência, pois a presença destes capacitores pode resultar em ressonâncias locais, ocasionando a circulação de correntes excessivas com subseqüentes danos aos próprios capacitores.

2.4 - LIMITES PARA NÍVEIS HARMÔNICOS

Ao se comparar com outros tipos de distúrbios presentes em sistemas elétricos, nota-se que é muito difícil fixar limites para as distorções harmônicas, isto porque os outros tipos de distúrbios, normalmente têm seus efeitos atenuados, à medida que a distância à fonte do distúrbio aumenta, ao passo que no caso de distorções harmônicas, uma ressonância pode ocorrer em um ponto remoto qualquer do sistema.

Devido às dificuldades que as distorções harmônicas apresentam de serem medidas e conseqüentemente interpretadas, quando da presença de uma certa distorção de tensão nos terminais de um consumidor qualquer, não se pode afirmar, a princípio, que este consumidor seja necessariamente a fonte de toda a distorção.

Uma outra dificuldade reside no fato de que o sistema apresenta uma característica dinâmica, o que torna possível a ocorrência ou não de certo grau de ressonância em determinados pontos do sistema em função do tempo, uma vez que ocorrem grandes variações nas fontes de freqüências harmônicas, na topologia do sistema e nas cargas resistivas que contribuem para um maior amortecimento das distorções harmônicas.

A aplicação dos limites absolutos de corrente harmônica para consumidores individuais poderia ocasionar direitos e deveres iguais a todos os consumidores, sejam eles de pequeno ou grande porte. Contudo, esta pode ser considerada uma aplicação injusta, levando-se em consideração que grandes consumidores podem estar conectados em pontos de contato elétrico com pequenos consumidores e que a cota que estes representam em relação ao montante total de carga é bem inferior à daqueles.

Ao se fixar limites para as distorções harmônicas geradas por um consumidor, deve-se assegurar uma certa isenção de distúrbios aos outros consumidores, embora cada um deles deva esperar alguma distorção harmônica na sua alimentação, sendo que esta distorção deve ser analisada e levada em conta a nível de projeto.

Ao mesmo tempo, os limites devem ser estipulados de tal modo que sejam fáceis de serem aplicados na fase de projeto e seu cumprimento possa ser comprovado após a energização do sistema.

Dentre os principais fatores que influenciam no desenvolvimento de padrões e normas para o controle de sistemas de potência na presença de frequências harmônicas, destacam-se os seguintes:

- O conteúdo harmônico de correntes e/ou tensões que pode ser expresso como um valor RMS individual ou como distorção harmônica total.
- O nível de tensão do sistema, distinguindo-se entre sistemas de distribuição e de transmissão.
- Uma avaliação da capacidade que as barras do sistema possuem de serem susceptíveis a distorções harmônicas. Na falta de uma informação detalhada sobre a impedância harmônica equivalente do sistema, esta capacidade pode ser expressa aproximadamente pelo nível de curto-circuito da barra.
- Identificação do tipo de carga com características não-lineares.

Convém ressaltar que a distorção harmônica não tem apenas seu valor em módulo, mas suas componentes terão um ângulo de fase em relação à frequência fundamental. Deste modo, a adição de outra fonte geradora de componentes harmônicas não implica necessariamente em aumentar a distorção, sendo que em alguns casos ocorre uma redução.

Até o presente momento tem-se tentado estabelecer uma norma uniforme sobre os limites permissíveis de correntes harmônicas e distorção de tensão. Existem alguns critérios, recomendações e normas já estipulados, mas que variam de acordo com os diversos países, que têm efetivamente os seguintes objetivos:

- a) manter as distorções das ondas de tensão e corrente em níveis toleráveis ao sistema de energia elétrica e seus componentes;
- b) respeitar as distorções máximas admissíveis por consumidor;
- c) garantir que o sistema de potência não interfira em outros sistemas, especialmente os sistemas de comunicação.

Para atender a estes objetivos, os critérios de limitação para as frequências harmônicas, adotadas por diferentes países, podem ser divididos em três grupos:

I - Limites para distorção total e/ou individual de tensão.

II - Limites para as componentes harmônicas de corrente injetadas no sistema.

III - Limites para as componentes harmônicas de corrente e de tensão.

• NORMAS E RECOMENDAÇÕES ADOTADAS NO BRASIL

O relatório elaborado em 1984 pelo Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), fundamentado em experiências de outros países (Inglaterra e Nova Zelândia), recomenda:

a) Para sistemas de tensão nominal inferior a 69 Kv, a tensão harmônica fase-terra, em qualquer PAC (Ponto de Acoplamento Comum), não pode exceder os seguintes limites:

- Harmônicas pares de tensão: 2%
- Harmônicas ímpares de tensão: 4%
- Distorção harmônica total de tensão: 5%

b) Para sistemas com tensão nominal maior ou igual a 69 Kv, são estabelecidos limites para as harmônicas individuais de tensão e corrente^[13].

2.5 - MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA PREVISÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS (O ESTADO DA ARTE)

A distorção harmônica em um ponto qualquer do sistema é, na maioria das vezes, resultado da operação de mais de um consumidor cujas cargas possuem características não-lineares. Neste caso a avaliação da distorção causada por cada consumidor torna-se difícil de ser efetuada através de medições, já que isso exigiria o desligamento de todos os demais, durante o tempo de análise. Entretanto, tal avaliação pode ser feita por aproximação, através de programas computacionais adequados para tal finalidade.

No princípio, alguns estudos de penetração harmônica, referentes à transmissão c.c. foram obtidos por meio de simulações analógicas. Contudo os resultados obtidos pela simulação de um modelo em escala reduzida de um sistema c.a. não foram coerentes com as medições realizadas.

Mais recentemente, modelos matemáticos têm sido desenvolvidos com capacidade de representar mais corretamente os elementos de um sistema de transmissão sob a influência de frequências harmônicas.

Qualquer atitude a ser tomada para viabilizar a atenuação e/ou eliminação de níveis harmônicos deve ser precedida pela identificação das fontes geradoras de distorções e a avaliação das ordens e níveis das frequências harmônicas que compõem a distorção total.

Este procedimento pode ter dois enfoques distintos, dependendo se o problema já existe em um sistema em operação, ou se o problema está sendo previsto.

Caso o problema esteja sendo previsto, é possível identificar na literatura alguns métodos básicos para a avaliação das distorções de tensão e/ou corrente. Estes métodos diferem entre si, basicamente, pela forma de se estimar as tensões distorcidas nas barras e pela investigação, no domínio do tempo ou da frequência.

• DOMÍNIO DO TEMPO

A investigação no domínio do tempo consiste na solução de um conjunto de equações diferenciais, utilizando métodos numéricos, possibilitando também a previsão do comportamento transitório do sistema, sendo os valores das tensões e das correntes determinados ponto a ponto, em um dado período.

Apresenta como maior inconveniente o fato de que o resultado obtido depende diretamente do passo escolhido na solução numérica, exigindo grande capacidade de armazenamento computacional caso seja necessária uma maior precisão. Deve-se levar em conta, também, a dificuldade que se tem em se representar os diversos equipamentos do sistema por equações diferenciais.

• DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A investigação no domínio da frequência trata o sistema na condição de operação em regime permanente em considerar as situações transitórias. Neste caso o sistema c.a. é tratado como múltiplos sistemas, cada um deles representando o sistema real em uma determinada frequência harmônica, necessitando, para isso, de uma representação razoável de cada componente do sistema em cada frequência harmônica.

Assim, utilizando-se os modelos adequados de cada componente do circuito, para uma dada faixa de frequência, a avaliação das distorções se torna viável para cada ordem harmônica, possibilitando um resultado composto por todas as ordens harmônicas presentes no sistema através da superposição dos efeitos individuais^[12].

Atualmente os programas desenvolvidos para estudos de penetração harmônica, em geral, utilizam métodos de solução que se baseiam naqueles aplicados aos estudos de fluxo de carga tradicionais. A estrutura geral seguida em tais estudos é fundamentada nos seguintes aspectos:

- Determinação das gerações harmônicas de tensão e corrente no sistema.
- Representação dos componentes passivos do sistema em função da frequência harmônica considerada.
- Obtenção da matriz admitância ou impedância de barras para cada frequência harmônica.
- Avaliação das tensões harmônicas nas barras e correntes harmônicas nas linhas.

• PROGRAMA HARP03^[15]

Dentre os principais programas computacionais associados a estudos de penetração harmônica, um dos mais difundidos na atualidade é o HARMONIC PROPAGATION - VERSÃO 03 - HARP03.

Tal programa é de natureza monofásica (representação por uma fase), sendo, portanto, mais adequado para ser utilizado em sistemas equilibrados, e tem como filosofia principal, o cálculo das impedâncias harmônicas do sistema (impedâncias próprias e de transferência) e posteriormente, o cálculo do fluxo harmônico nas linhas do sistema em estudo.

Como resultado final, fornece valores de tensão e corrente para cada frequência harmônica especificada. Para sua execução é necessário o fornecimento dos seguintes dados:

- ordens harmônicas a serem consideradas
- frequência nominal do sistema
- limites de tensão para distorções harmônicas individuais e totais
- parâmetros das linhas de transmissão
- parâmetros dos transformadores
- parâmetros dos filtros
- parâmetros dos bancos de capacitores
- parâmetros dos bancos de reatores
- parâmetros das cargas shunt
- parâmetros dos geradores e cargas instaladas
- geração harmônica em uma determinada barra do sistema (podendo esta geração harmônica ser incorporada sob a forma de corrente harmônica injetada ou de tensão harmônica aplicada).

Como saída, este programa fornece os seguintes resultados principais:

- Impedância própria de cada ponto de injeção harmônica.
- As tensões harmônicas em cada barra do sistema.
- Correntes harmônicas em cada linha do sistema.

Com relação à estrutura básica de funcionamento do HARP03, cabe ressaltar:

- caso exista em uma mesma barra mais de um ponto de injeção de corrente harmônica, as componentes harmônicas de mesma ordem serão adicionadas vetorialmente, constituindo um único ponto de injeção.
- a única forma de se injetar correntes harmônicas no programa se dá através da obtenção destas correntes via medição. Essa particularidade inviabiliza a utilização deste programa para sistemas em fase de planejamento, visto que a medição só se torna possível em sistemas já em fase de operação.

• PROGRAMA HARMOD^[15]

O programa computacional de fluxo harmônico HARMOD, por ser uma versão do programa HARP03, possui em sua estrutura geral as mesmas características do programa original.

As modificações realizadas neste não alteram substancialmente o algoritmo do método, tendo como alteração relevante a implementação de modelos de cargas elétricas especiais, sob o ponto de vista da geração harmônica.

O procedimento adotado para o estudo destes equipamentos e a conseqüente obtenção das correntes harmônicas geradas pelos mesmos é realizado da seguinte forma:

- Análise do princípio de funcionamento do equipamento e a obtenção do modelo elétrico estabelecido por sua forma de operação.
- Desenvolvimento de uma formulação para a corrente de alimentação do equipamento.
- Aplicação da análise de Fourier na expressão encontrada para a corrente de alimentação do equipamento em questão.

• PCFHSP^[13]

O PACOTE COMPUTACIONAL FORTRAN PARA HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA (PCFHSP)^[13], é um programa de estudo de fluxo harmônico trifásico, capaz de analisar sistemas desequilibrados e considerar acoplamentos mútuos entre linhas e fases.

Utiliza um processo iterativo para determinar as ordens e as magnitudes das correntes harmônicas geradas pelas fontes de distorção, sendo que estas fontes se relacionam interativamente com o sistema. Portanto, busca a maior generalização possível para a solução dos mais variados problemas relacionados com a distorção harmônica.

A necessidade de um processo iterativo dá-se pelo fato de que as harmônicas características geradas pelas fontes tem como referência a alimentação senoidal e equilibrada. No entanto, as próprias fontes se encarregam de alterar esta situação, fazendo com que harmônicas de ordens não-características também surjam. Como as correntes harmônicas se propagam pelo sistema, as tensões são distorcidas não só no barramento onde a fonte está inserida, mas também em outros barramentos. Isto faz com que uma fonte eventualmente distorça a alimentação de outra, caracterizando uma interação entre elas, o que levará a um resultado final, após a realização de um processo iterativo, que será truncado quando uma dada tolerância for alcançada.

O programa PCFHSP foi inicialmente criado para analisar distorções harmônicas até a 50ª ordem. É um método baseado na injeção de correntes e, portanto, necessita de uma rotina externa para realizar o balanço do fluxo de potência no sistema. Avalia as distorções no domínio da frequência, ou seja, calcula a matriz impedância de barra do sistema para cada ordem harmônica.

Este programa permite dois tipos de avaliação do sistema submetido à distorções harmônicas: pode-se simplesmente levantar o equivalente do sistema visto da barra (impedância de Thévenin) em função do aumento da frequência ou calcular as tensões e correntes distorcidas em cada barra e as correntes em cada ramo, determinando-se os fatores de distorção de modo a se concluir sobre a qualidade da alimentação fornecida.

No primeiro caso não são consideradas as injeções de corrente e o esforço computacional é grande, visto que, para se estabelecer um espectro da variação da impedância em função da frequência, é necessário definir-se o maior número de pontos possíveis, de modo a identificar as variações no comportamento do sistema com a variação da frequência. Assim, é necessário calcular tantas matrizes impedância de barra quanto permitir o dimensionamento do programa.

No segundo caso, são determinadas as distorções das tensões devidas aos fluxos de correntes harmônicas. Neste caso, apenas as matrizes impedância referentes as ordens harmônicas existentes nas injeções de corrente são calculadas e, mesmo com o processo iterativo, o tempo computacional e a memória requerida é bem menor que no primeiro caso.

2.6 - PROPOSTA DO TRABALHO

Conforme o que foi apresentado até aqui, percebe-se que as ferramentas desenvolvidas para avaliação de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente em sistemas de energia elétrica, apresentam uma filosofia baseada em métodos iterativos de cálculo. Como consequência, estas ferramentas apresentam uma característica de difícil implementação e utilização, como é o caso do PCFHSP e do HARP03 que têm sido alvo de estudos no sentido de implementar modificações significativas com o objetivo de viabilizar sua implementação através de equipamentos de pequeno e médio porte, facilitando ao usuário, sua implementação [14,15].

O tratamento dado às distorções harmônicas em sistemas de potência, tem sido feito, com algumas exceções, a partir da constatação da presença de distorções harmônicas, procurando-se eliminá-las ou minimizá-las, através da instalação de filtros com características determinadas por programas computacionais, constituindo-se, portanto, de medidas predominantemente corretivas.

Os resultados apresentados por este tipo de tratamento poderiam ser antecipados a partir do momento em que se dispusesse de um artifício que permitisse viabilizar uma análise antecipada das prováveis distorções harmônicas, antes mesmo da instalação da carga não-linear no sistema.

Na tentativa de viabilizar tais objetivos, este trabalho propõe a implementação de uma ferramenta computacional capaz de diagnosticar prováveis distorções harmônicas antes da colocação do sistema em operação, conhecendo-se apenas a localização e o porte da carga não-linear a ser instalada.

O método aqui proposto, tenta dar um enfoque maior no âmbito preventivo, no que diz respeito a todo tipo de sistemas elétricos, uma vez que deve ser capaz de fornecer diagnósticos representativos do comportamento do sistema elétrico, quando da instalação de cargas não-lineares, com a ressalva de que este objetivo pode ser atingido sem demandar grande esforço computacional.

Este trabalho não tem a pretensão de substituir os métodos de avaliação já existentes, principalmente aqueles que são utilizados em situações mais complexas que podem envolver, por exemplo, desequilíbrios entre fases, distorções de múltiplas fontes não-lineares, efeitos mútuos entre linhas, interação entre a fonte geradora de distorções e o sistema, etc., mas tenta se revelar como uma proposta para ser utilizada em sistemas, ou áreas de sistemas, onde não existam, ainda, cargas não-lineares, mas cuja instalação seja eminente, para uma primeira avaliação das distorções decorrentes, principalmente por se tratar de uma ferramenta computacional de processamento extremamente rápido.

CAPÍTULO 3

PRINCIPAIS FONTES HARMÔNICAS

3.1 - INTRODUÇÃO

A característica básica da operação dos diodos e tiristores é a de conduzir a corrente em apenas um sentido, bloqueando-a no outro. Os circuitos que se utilizam destas características são denominados conversores estáticos (controlados ou não). Com o auxílio destes dispositivos a energia elétrica pode ser convertida de quatro formas distintas, como mostra a Figura 3.1 a seguir:

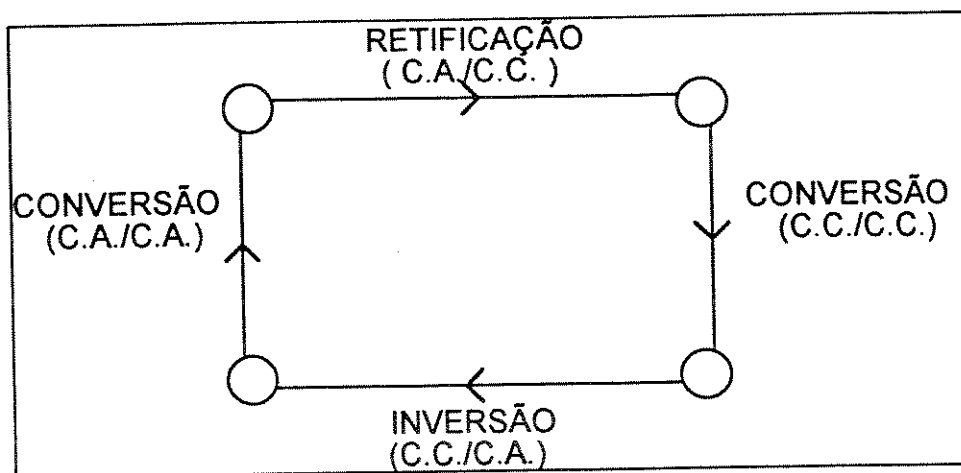


Figura 3.1 - FORMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

a) RETIFICAÇÃO

A conversão de corrente alternada em corrente contínua pode ser obtida com circuitos a diodos denominados retificadores não controlados. Desta forma obtém-se na saída do conversor um nível fixo de tensão contínua, se a entrada também for constante. No caso de retificadores controlados, pode-se obter a partir de uma tensão alternada constante, uma tensão contínua variável.

b) CONVERSÃO : c.c. em c.c.

Uma segunda forma de conversão de energia é a de transformar tensão contínua em contínua, em vários níveis. Sua aplicação é encontrada em sistemas onde se necessita de níveis variados de tensão c.c. a partir de um valor fixo.

c) INVERSÃO

Caracteriza-se pela transformação de tensão contínua em alternada. Uma das concepções deste sistema é de se definir uma tensão e frequência através do próprio inversor. Por outro lado, existe também uma inversão em que a tensão e frequência são definidas pelo sistema alimentador c.a., como ocorre nos sistemas de transmissão de energia elétrica em c.c.

d) CONVERSÃO : c.a. em c.a.

Denominado Regulador c.a., tem por função transformar c.a. em c.a. com tensão controlada a partir de um valor máximo.

Todos estes conversores citados, constituídos por semicondutores apresentam vantagens em termos de espaço físico, instalação, tempo de resposta e manutenção, tendo como maior inconveniente, a geração de frequências harmônicas. Apesar disto, apresentam aplicação bastante difundida nos dias atuais e possuem um comportamento bastante definido, o que conduz a um tratamento matemático e uma modelagem relativamente precisos.

Existem outras cargas não menos importantes, como o caso dos fornos de arco, que apesar de serem menos freqüentes, quando encontradas, são as mais preocupantes dentro do sistema. Sua natureza de operação praticamente impossibilita um tratamento preciso de sua geração harmônica, ficando a análise restrita ao campo empírico.

3.2- CONVERSORES ESTÁTICOS

Devido ao seu estágio de desenvolvimento e à grande aceitação em aplicações industriais, os conversores estáticos apresentam uma grande importância, senão a maior, como geradores de frequências harmônicas nos sistemas c.a..

• PONTE RETIFICADORA TRIFÁSICA

O circuito apresentado na Figura 3.2 corresponde a uma ponte retificadora trifásica, onde a identificação dos diodos indica a seqüência natural de condução dos mesmos quando as tensões fase-neutro constituem um sistema de tensões trifásicas de seqüência positiva.

O funcionamento da ponte pode ser entendido tomando-se inicialmente o caminho formado pelos diodos 1,3,5 e o neutro, e depois o caminho formado pelos diodos 4,6,2 e o neutro.

Com o primeiro caminho pode-se avaliar a forma de onda da tensão na saída da ponte entre o terminal superior, antes do reator de alisamento, e o neutro; já com o segundo caminho obtém-se a forma de onda da tensão na saída da ponte entre o terminal inferior, antes do reator de alisamento, e o neutro.

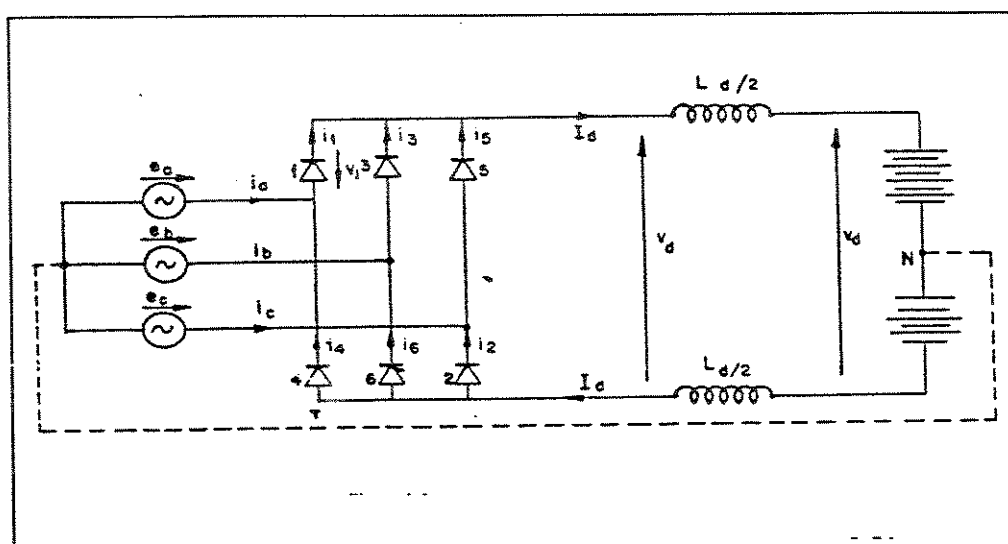


Figura 3.2 - PONTE RETIFICADORA TRIFÁSICA

Esta ponte trifásica não permite nenhum controle sobre a potência, uma vez que a tensão de saída é fixada pela tensão de alimentação e a corrente I_d é constante, uma vez fixada a carga.

As formas de onda da tensão contínua e das correntes de alimentação do conversor são apresentadas na Figura 3.3.

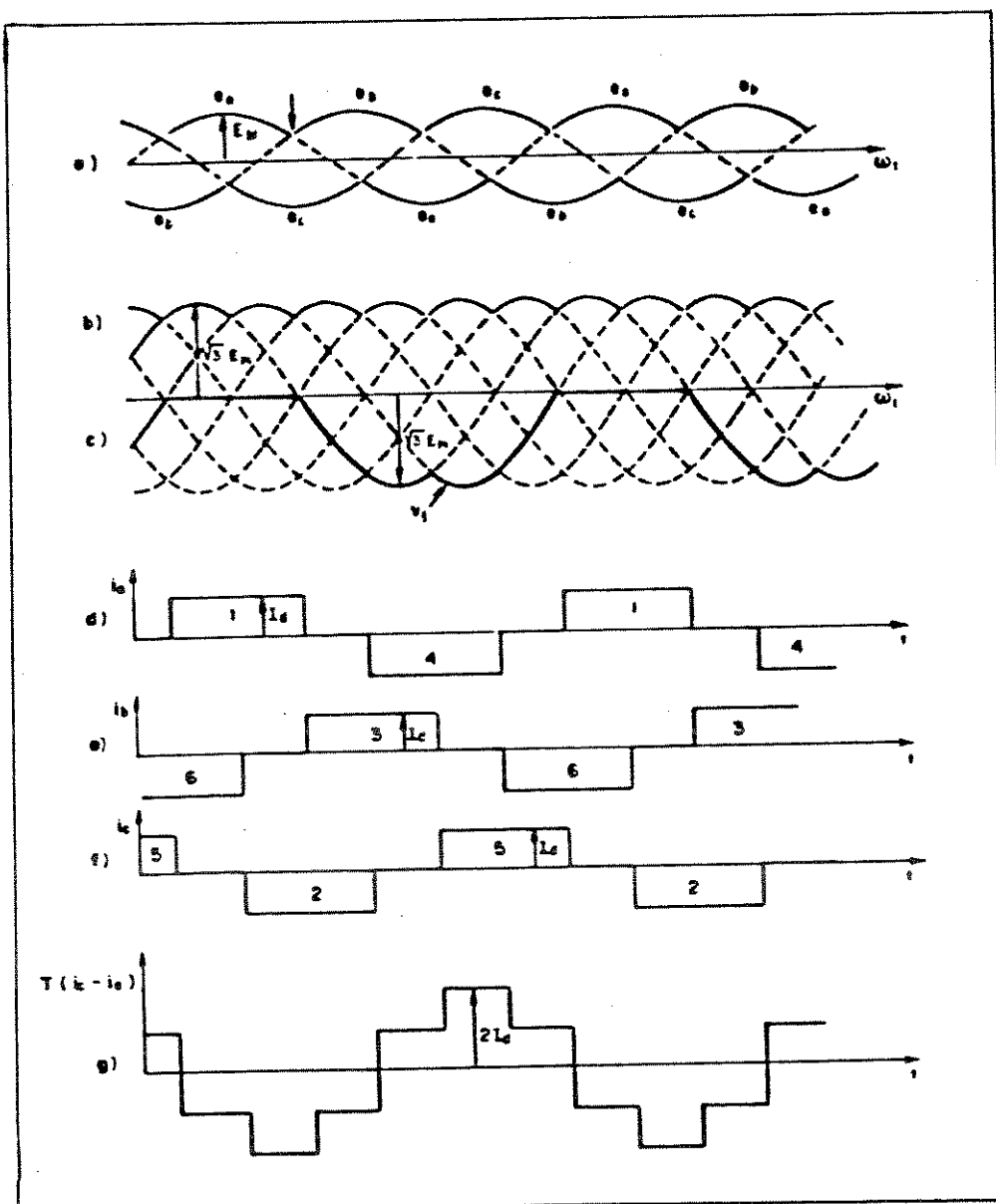


Figura 3.3 - FORMAS DE ONDA DAS TENSÕES E CORRENTES DE UMA PONTE TRIFÁSICA IDEAL

Pontes trifásicas são mais bem utilizadas quando se efetua o controle de potências, o que só é possível atuando-se sobre o início da condução de cada válvula. O dispositivo que permite o controle do início da condução, também chamado de controle de ignição, é o tiristor.

Este componente apresenta características de funcionamento similares às do diodo quanto à polarização, exigindo um sinal de controle no seu gatilho ou porta para entrar em condução.

Deste modo, substituindo-se os diodos da ponte retificadora trifásica por tiristores, tem-se o conversor estático de seis pulsos, como ilustrado na Figura 3.4.

• CONVERSOR ESTÁTICO DE SEIS PULSOS A TIRISTORES

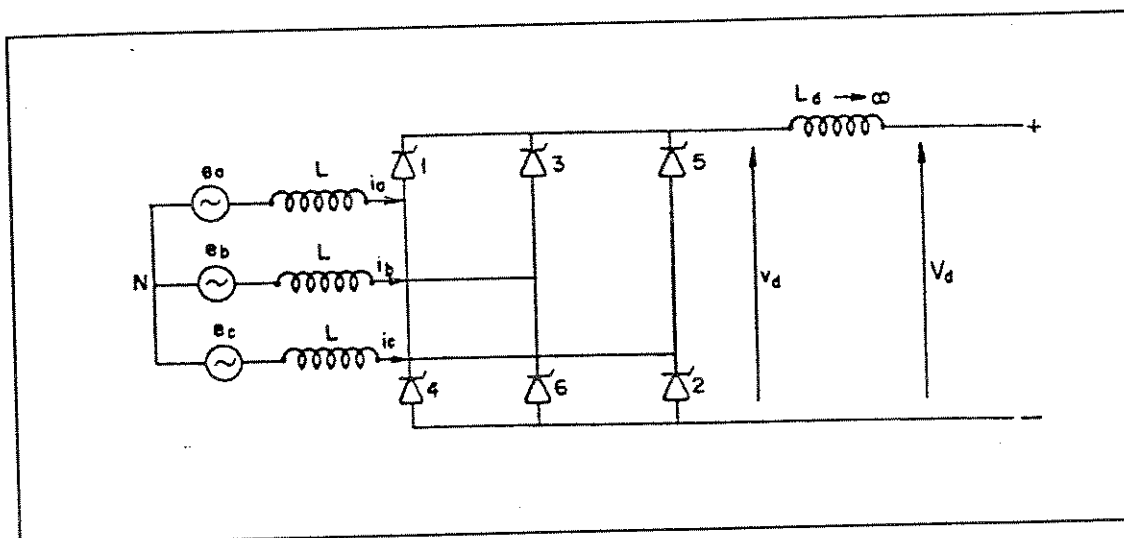


Figura 3.4 - CIRCUITO DO CONVERSOR ESTÁTICO DE SEIS PULSOS

Supondo-se que as f.e.m.'s e_a , e_b e e_c da Figura 3.4, não possuam conteúdo harmônico e constituam um sistema de tensões trifásico de sequência positiva, então estas tensões podem ser expressas por:

$$e_a = E_m \sin \omega t \quad (3.1)$$

$$e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.2)$$

$$e_c = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (3.3)$$

Assim as tensões de linha são dadas por:

$$e_{ac} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t - 30^\circ) \quad (3.4)$$

$$e_{ba} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t - 150^\circ) \quad (3.5)$$

$$e_{cb} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (3.6)$$

Estas tensões são representadas na Figura 3.5.

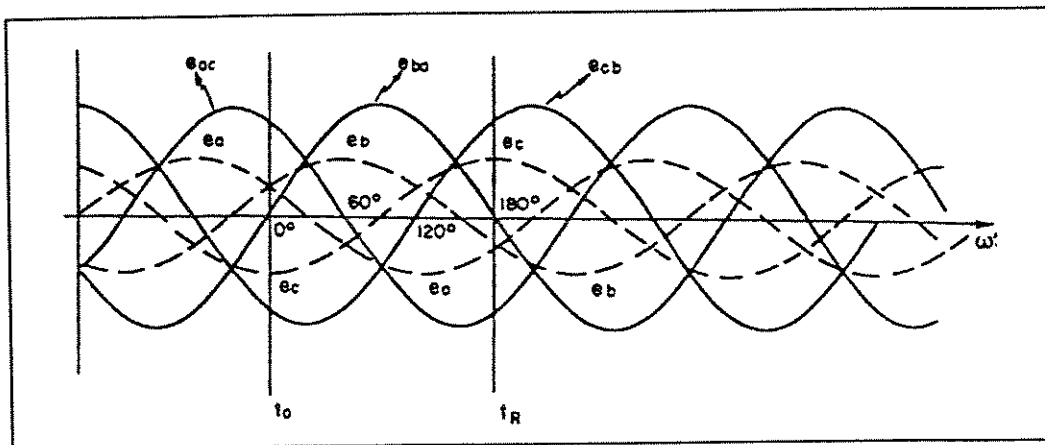


Figura 3.5 - REPRESENTAÇÃO DAS F.E.M.'S QUE ALIMENTAM O CONVERSOR

Antes do instante t_a , na Figura 3.5, a válvula 1 estava conduzindo. Não existindo controle de ignição, haverá uma comutação automática da válvula 1 para a válvula 3 no instante t_a . Instantes similares a este são denominados instantes de tensão zero.

Quando estes instantes ocorrem, pulsos de ignição podem atingir o gatilho dos tiristores. Como existem seis pontos de intersecção entre as f.e.m.'s dentro de um ciclo das ondas de tensão, então exige-se a geração de seis pulsos neste intervalo.

Considerando-se a existência do controle de ignição, que se baseia na existência de um dispositivo capaz de atrasar os pulsos que atingem os gatilhos dos tiristores, atrasando assim os instantes de comutação e supondo-se o mesmo atraso para os seis pulsos, a ignição das válvulas ocorrerá em intervalos iguais à $1/6$ de ciclo.

Em um dado instante anterior a t_a , a válvula 1 está conduzindo, ou seja, a válvula 1 comporta-se como um curto-circuito. Quando o instante t_a é atingido, o ânodo da válvula 3 torna-se positivo em relação ao ânodo da válvula 1. Se estas válvulas fossem diodos, a válvula 3 iniciaria a condução imediatamente, e assumiria a corrente da válvula 1, ou seja, a válvula 3 retiraria a válvula 1 de operação. Entretanto, já que as válvulas utilizadas são tiristores, é possível atrasar o instante do início da comutação. Este efeito é mostrado na Figura 3.6.

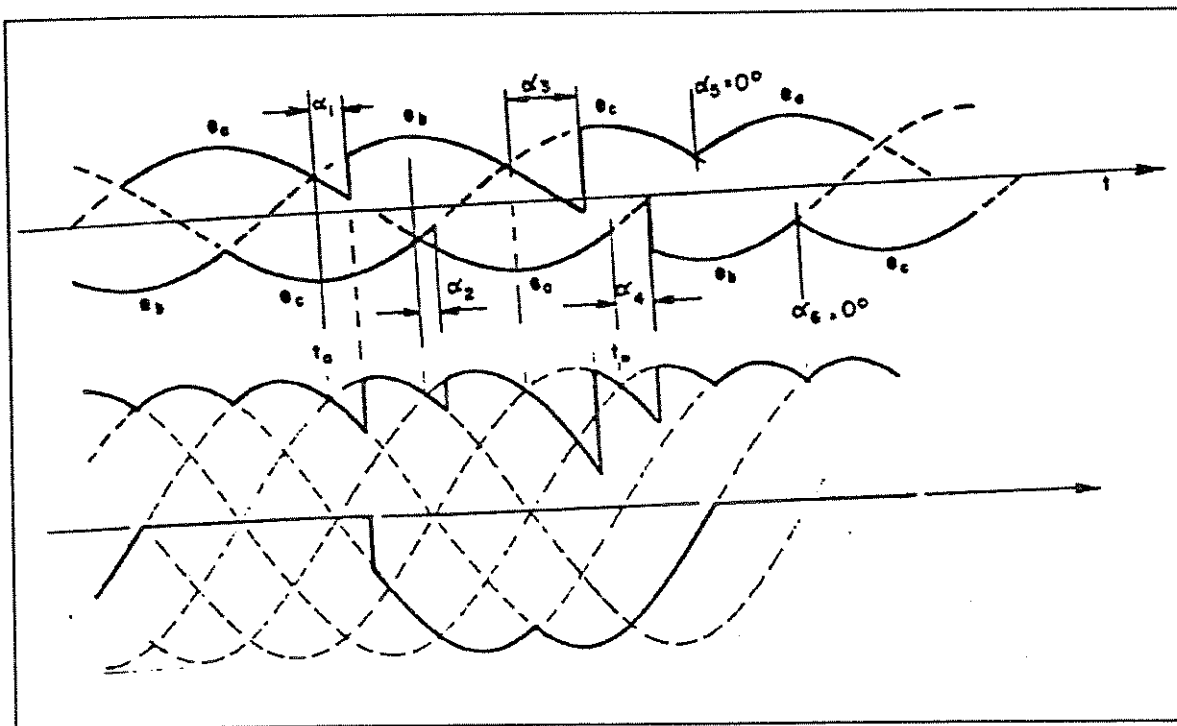


Figura 3.6 - TENSÃO DE SAÍDA DE UM CONVERSOR COM CONTROLE DE IGNIÇÃO

O ângulo de atraso α , é medido em relação ao instante em que a válvula iniciaria a condução caso fosse um simples diodo.

A tensão c.c. antes do reator c.c. é obtida pela diferença entre as tensões do terminal positivo e do terminal negativo. Pela Figura 3.5 pode-se observar que o valor do ângulo α pode variar entre 0° e 180° . A impossibilidade de se conseguir ângulos de atraso maiores que 180° prende-se ao fato da ocorrência da desigualdade $e_b > e_a$ se dar apenas entre $t = t_a$ e $t = t_r$.

Verifica-se que o efeito do ângulo de atraso é alterar o valor da tensão média c.c., já que de acordo com a variação deste, o valor da tensão média pode variar de valores positivos a valores negativos. Como mostra a Figura 3.7.

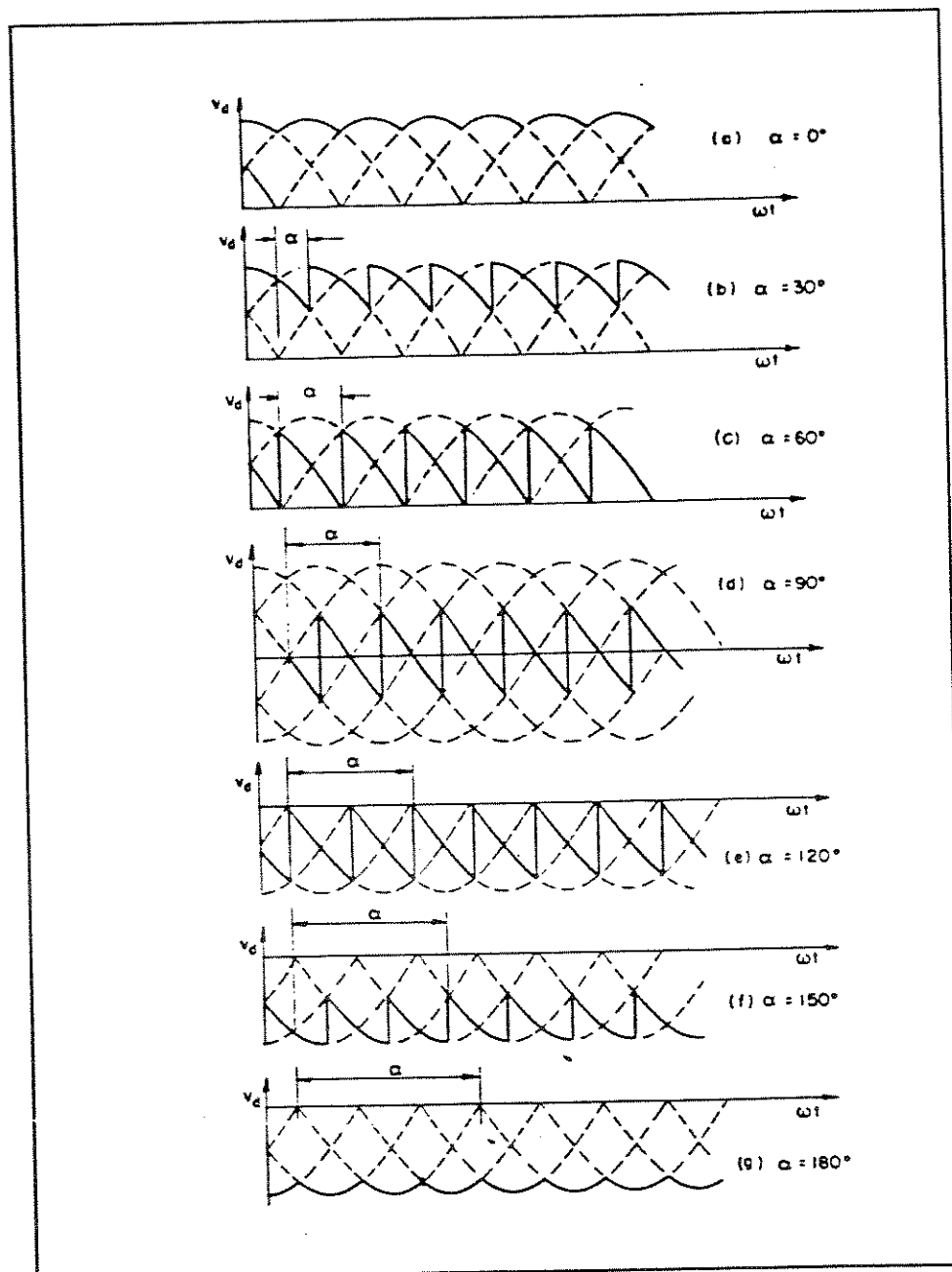


Figura 3.7 - TENSÃO V_d PARA DIFERENTES α 's

Se o valor de α for zero, os pulsos retangulares de corrente do lado c.a. estão centralizados em relação ao valor de pico das correspondentes tensões fase-neutro. Obtendo-se a componente fundamental da corrente, por exemplo, da linha a, verifica-se que e_a e i_{a1} estão em fase.

Caso a comutação se efetive com um valor de α diferente de zero, os blocos de corrente serão deslocados para a direita e conseqüentemente as correspondentes componentes fundamentais serão também deslocadas de α .

Uma vez que a tensão e_a não foi alterada, verifica-se uma diferença de fase entre e_a e i_{a1} . Este ângulo entre e_a e i_{a1} é denominado deslocamento de fase. A relação entre o ângulo de atraso e o deslocamento de fase é mostrada na figura 3.8.

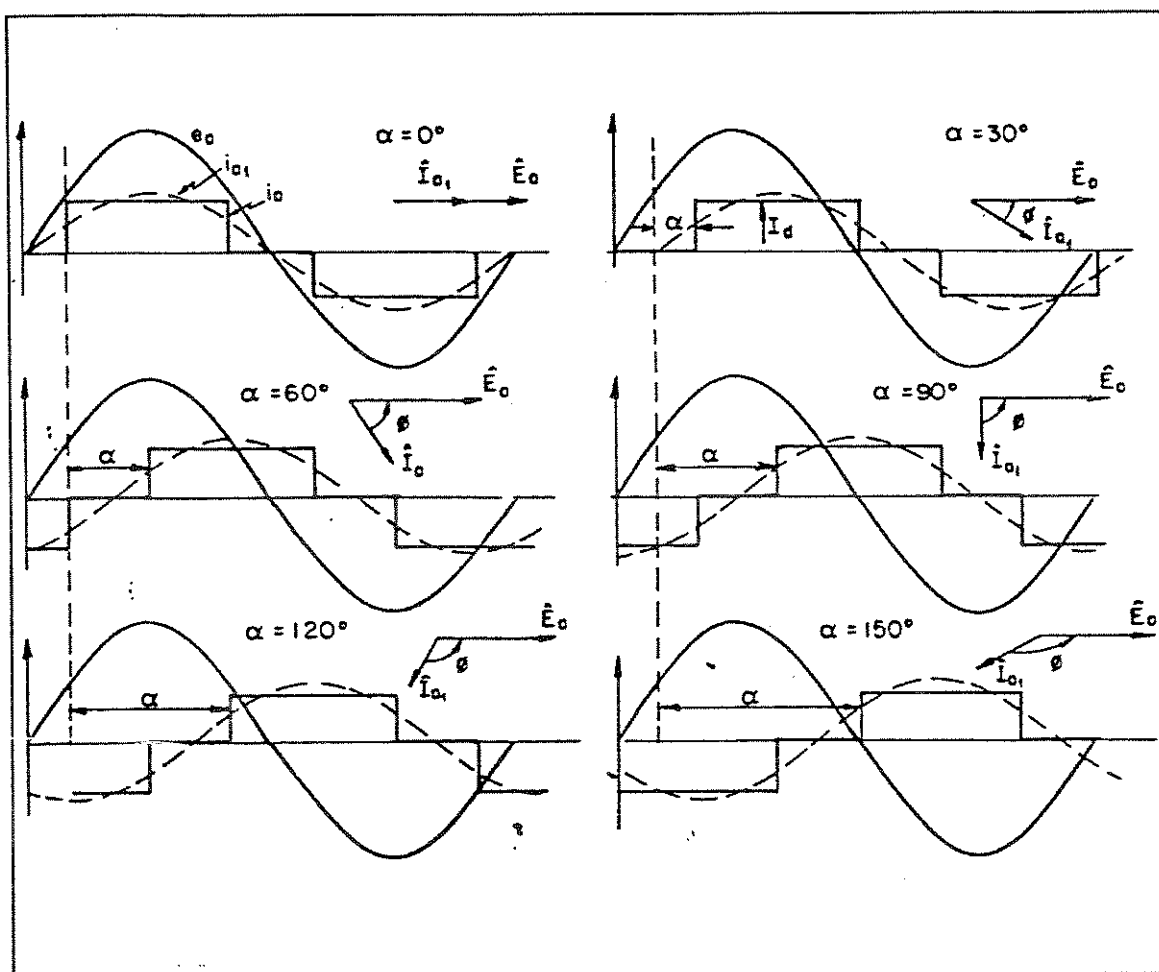


Figura 3.8 - RELAÇÃO ENTRE ϕ E α

Esta diferença de fase justifica o inerente consumo de potência reativa que acompanha a operação dos conversores estáticos de potência.

3.2.1- HARMÔNICAS CARACTERÍSTICAS

Tomando-se uma das formas de onda de corrente de linha encontrada sob condições ideais, como as apresentadas na Figura 3.8, tem-se por exemplo:

$$i(\omega t) = \begin{cases} 0, p / 0 < \omega t < \pi/6 \\ Id, p / \pi/6 < \omega t < 5\pi/6 \\ 0, p / 5\pi/6 < \omega t < 7\pi/6 \\ -Id, p / 7\pi/6 < \omega t < 11\pi/6 \\ 0, p / 11\pi/6 < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (3.7)$$

que pode ser expressa pela Série de Fourier:

$$i(t) = 1/2 I_o + \sum_{n=1}^{\infty} [I_{an} \cos n\omega t + I_{bn} \sin n\omega t] \quad (3.8)$$

Cujos coeficientes de Fourier podem ser facilmente expressos por:

$$I_o = 0 \quad (3.9)$$

uma vez que o valor médio da forma de onda de $i(t)$ é nulo.

$$\begin{aligned} I_{an} &= 2/T \int_0^T i(t) \cos (2\pi n t/T) dt = \\ &= 2/2\pi \int_0^T i(t) \cos n\omega t d\omega t = \\ &= 2/2\pi \left[\int_{7\pi/6}^{11\pi/6} Id \cos n\omega t d\omega t + \int_{\pi/6}^{5\pi/6} -Id \cos n\omega t d\omega t \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2/2\pi \left[Id/n \sin n\omega t \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6} + (-Id/n) \sin n\omega t \Big|_{7\pi/6}^{11\pi/6} \right] = \\
&= 0 \text{ para qualquer } n.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Similarmente tem-se:

$$\begin{aligned}
I_{bn} &= 2/T \int_0^T i(t) \sin 2\pi/T nt dt = \\
&= 2/2\pi \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin n\omega t d\omega t = \\
&= 2/2\pi \left[\int_{\pi/6}^{5\pi/6} Id \sin n\omega t d\omega t + \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} -Id \sin n\omega t d\omega t \right] = \\
&= 2/2\pi \left[-Id/n \cos n\omega t \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6} + Id/n \cos n\omega t \Big|_{7\pi/6}^{11\pi/6} \right] = \\
&= 0 \text{ para todo } n \text{ par e } n \text{ múltiplo de } 3.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Deste modo, as ordens harmônicas encontradas na decomposição pela série de Fourier podem ser expressas por:

$$n = 6k \pm 1, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots \tag{3.12}$$

sendo os respectivos coeficientes de Fourier dados por:

$$I_{bn} = (-1)^k I_{b1}/n \tag{3.13}$$

Já que este tipo de conversor é denominado estático de seis pulsos, uma vez que a tensão contínua, antes do reator de alisamento, apresenta uma frequência de seis vezes a frequência nominal da rede c.a., as harmônicas de corrente que aparecerão no sistema c.a. são denominadas **harmônicas características**, posto ser estas as ordens harmônicas exclusivas que são geradas para este conversor estático sob alimentação trifásica simétrica sem conteúdo harmônico.

Para uma análise mais eficiente do comportamento dos conversores estáticos devem ser levadas em consideração as diferentes condições de operação a que este pode estar sujeito. Dentre tais condições destacam-se as seguintes:

a) OPERAÇÃO EM CONDIÇÕES IDEAIS

Deve ser entendido por condições ideais de operação as seguintes condições abaixo relacionadas:

- tensão de alimentação perfeitamente equilibrada e livre de distorções harmônicas;
- resistências c.a. desprezíveis;
- indutâncias c.a. desprezadas;
- inexistência de erros aleatórios nos pulsos de ignição dos tiristores;
- efeitos devido à saturação dos transformadores desprezíveis;
- reatância de alisamento infinita;
- ângulo de comutação desprezado.

b) EFEITO DA REATÂNCIA C.A. - COMUTAÇÃO COM ÂNGULO DE SOBREPOSIÇÃO

Devido à reatância do sistema c.a. de alimentação, principalmente a do transformador, as correntes de linha, antes indicadas por blocos (variação instantânea de zero a I_d ou $-I_d$) podem variar apenas segundo uma taxa finita.

Conseqüentemente, a transferência de corrente de uma válvula para outra é processada dentro de um tempo diferente de zero. Este tempo, durante o qual uma válvula está comutando para outra, é denominado tempo de comutação ou tempo de sobreposição (overlap) e é dado por:

$$t = \mu / w$$

onde:

w = frequência angular

μ = ângulo de sobreposição

Em situações normais μ é menor que 60° e situa-se entre 20° e 25° .

c) OPERAÇÃO EM CONDIÇÕES NÃO IDEAIS

A figura 3.9 mostra o circuito simplificado de um conversor de seis pulsos e sua conexão ao sistema c.a..

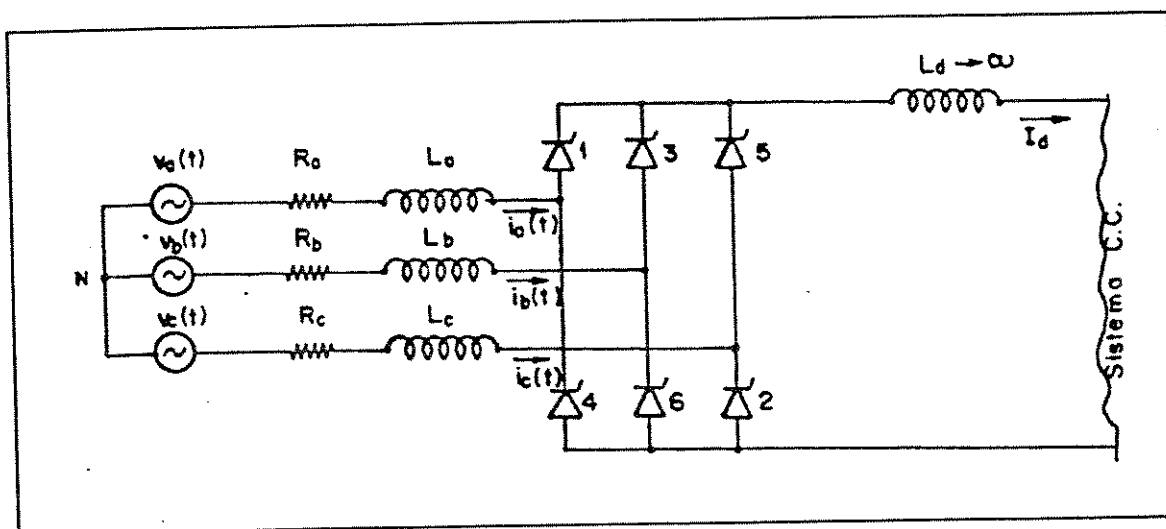


Figura 3.9 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM CONVERSOR DE SEIS PULSOS

Considera-se não ideais as seguintes condições de operação:

- Tensões de alimentação desequilibradas e / ou com distorções harmônicas, podendo as harmônicas também apresentarem desequilíbrios entre fases.
- Impedâncias do sistema c.a. desequilibradas.
- Indutância de alisamento (L_d) finita.

d) COMUTAÇÃO ASSIMÉTRICA

Para que a comutação seja simétrica, todos os parâmetros das três fases devem ser idênticos, caso contrário tem-se a ocorrência de comutações assimétricas. As diferenças entre estes parâmetros estão diretamente ligadas aos desequilíbrios do sistema alimentador. Como consequência, serão geradas ordens harmônicas não-características, com ênfase especial à terceira harmônica e suas múltiplas ímpares.

A Figura 3.10 ilustra os circuitos equivalentes de duas comutações que envolvem na corrente da fase b.

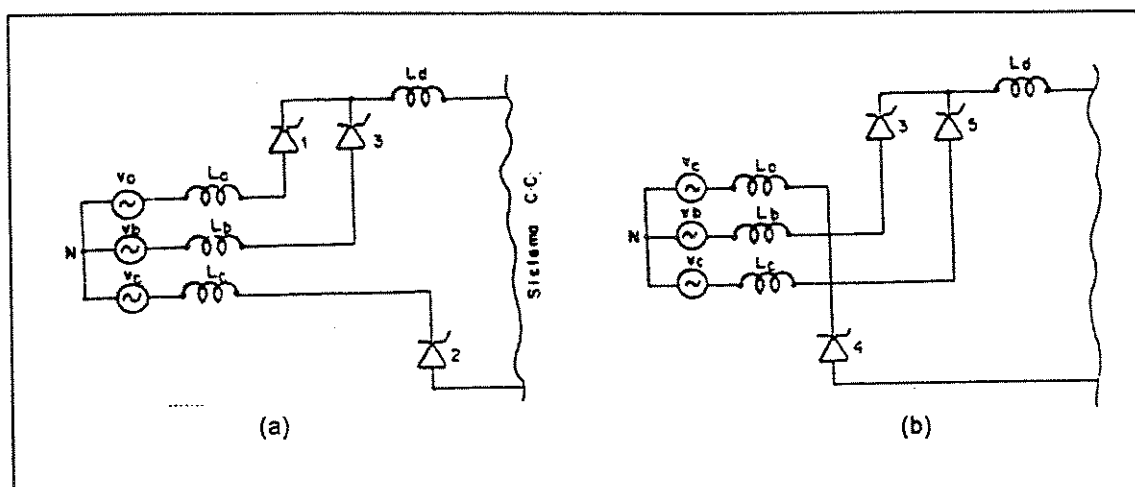


Figura 3.10 - CIRCUITOS EQUIVALENTES DE DUAS COMUTAÇÕES DA FASE b.

- a) Da válvula 1 para a válvula 3
b) Da válvula 3 para a válvula 5

Como exemplo, considere-se que as indutâncias L_a , L_b e L_c apresentem valores diferentes, portanto a indutância total de cada comutação, genericamente denominada L_{nm} ($L_{nm} = L_n + L_m$, onde n e m são as duas fases envolvidas na comutação), apresentará diferentes valores. Assim a corrente que se estabelece durante o tempo de comutação terá características diferentes, uma vez que envolve parâmetros diferentes.

No exemplo da Figura 3.10 a comutação da válvula 1 para a válvula 3 envolve a indutância $L_a + L_b$, já a comutação da válvula 3 para a válvula 5 envolve a indutância $L_b + L_c$.

A assimetria resultante pode ser apreciada na Figura 3.11, onde é apresentada a corrente da fase b do sistema.

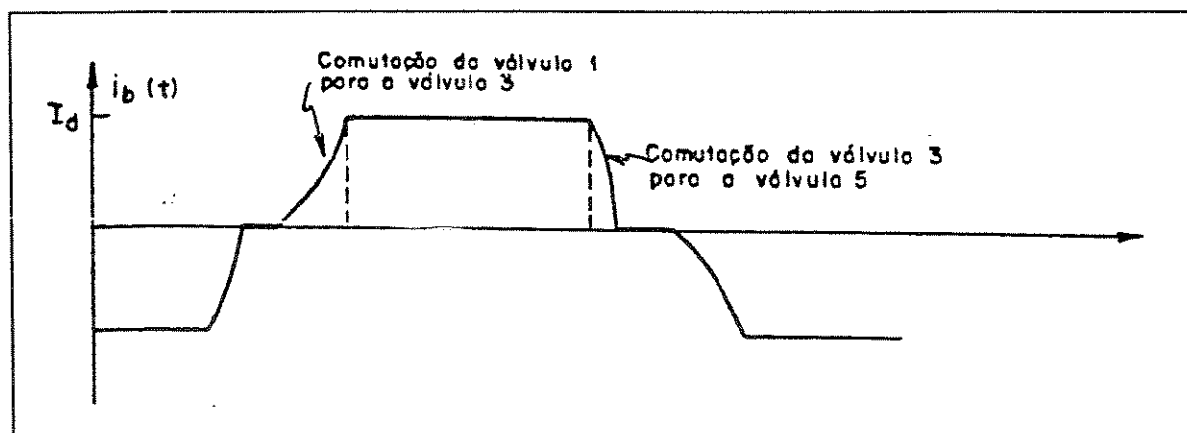


Figura 3.11 - CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DA FASE b APRESENTANDO COMUTAÇÕES ASSIMÉTRICAS.

Outros tipos de desequilíbrios entre as fases podem ocorrer, sendo que todos eles levam a assimetrias na comutação e portanto à geração de harmônicas não-características.

• INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE PRODUÇÃO DE PULSOS

A função do sistema de produção de pulsos é gerar e enviar os pulsos de ignição para inicializar a condução das válvulas. Existem basicamente dois métodos nos quais se baseiam os circuitos de disparo. A diferença fundamental entre eles está no modo com que os pulsos são gerados. Assim tem-se os sistemas com Controle Individual de Pulsos (CIP) e os sistemas com Pulsos Igualmente Espaçados (PIE).

Para os sistemas com Controle Individual de Pulsos os disparos são determinados com base nos instantes de cruzamento das tensões c.a. que alimentam o conversor. A partir deste instante e do ângulo de atraso, é enviado o pulso de ignição para a respectiva válvula que se encontra devidamente polarizada.

Este método é bastante sensível a qualquer mudança nas formas de onda das tensões fase-neutro. Quando estas se apresentarem desequilibradas, ou com alguma distorção harmônica, os pontos de intersecção das tensões não estarão igualmente espaçados. Como os ângulos de ignição são contados a partir dos pontos de intersecção, os pulsos se darão em intervalos desiguais.

A figura 3.12 mostra um sistema com tensões desequilibradas, onde se constata facilmente o espaçamento irregular dos pulsos de ignição e a conseqüente assimetria nas formas de onda das correntes de alimentação, caracterizadas pela existência de intervalos de condução diferentes de 120° , e o aparecimento de ordens harmônicas não-características.

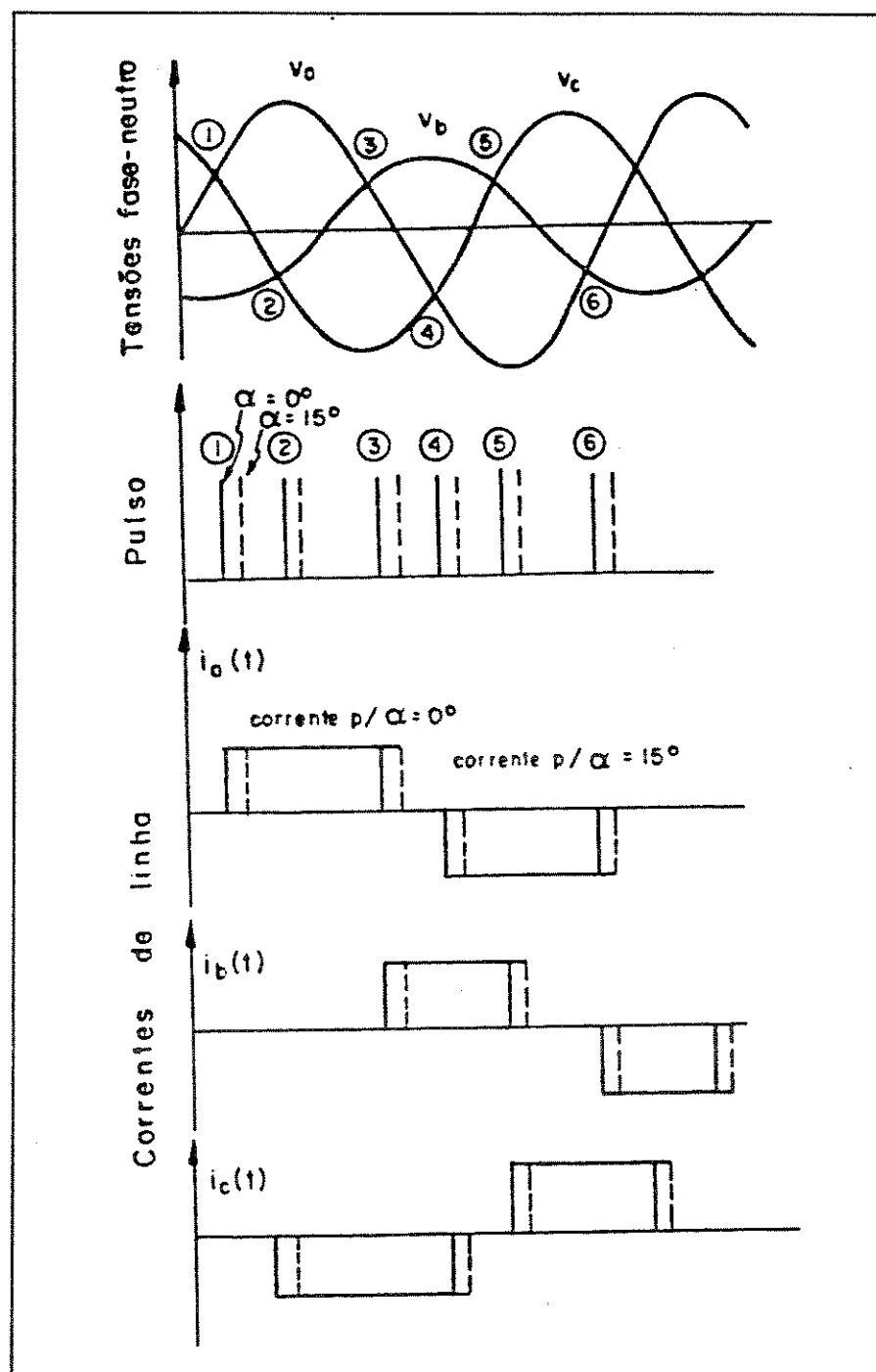


Figura 3.12 - CORRENTES DE ALIMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR DE SEIS PULSOS
 $L_a = L_b = L_c = 0, L_d \rightarrow \infty$
 E SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PULSOS CIP.

Convém salientar que mesmo que as tensões estivessem perfeitamente equilibradas, a ocorrência de erros inerentes aos próprios circuitos de disparo pode ser constatada em sistemas do tipo CIP, cujos valores atingem $\pm 3^\circ$ na operação como retificador e $\pm 1,5^\circ$ na operação como inversor^[16].

A principal característica dos sistemas com Pulsos Igualmente Espaçados é a sua operação praticamente independente das tensões de alimentação. Estas servem apenas como sinais para sincronização e não para a definição dos instantes em que os disparos são efetuados.

Os pulsos produzidos pelo sistema PIE deverão estar sempre igualmente espaçados de 60° (a despeito da possibilidade da ocorrência de erros aleatórios associados ao circuito de disparo de cerca de $\pm 0,4^\circ$), mesmo que as tensões de alimentação não estejam equilibradas. Assim, as correntes de alimentação se apresentarão com formas de onda simétricas, ou seja, com intervalos de condução de 120° , não propiciando o aparecimento de ordens harmônicas não-características.

CAPÍTULO 4

MODELOS DE COMPONENTES

4.1 - INTRODUÇÃO

De um modo geral os sistemas de distribuição e transmissão apresentam um comportamento notadamente indutivo à frequência fundamental da rede. Deste modo, a utilização de equivalentes de sistemas baseados na potência de curto-circuito pode ser adequada à solução dos problemas envolvendo estes sistemas à frequência fundamental.

Quando um sistema elétrico fica sujeito a injeções harmônicas, é necessário avaliar o comportamento deste para cada uma das frequências presentes.

Na tentativa de se mitigar as propagações harmônicas através de um sistema elétrico é necessário conhecer detalhadamente o comportamento deste sistema, bem como os modelos individuais de seus componentes.

Tomando-se um sistema elétrico numa dada condição de carregamento, a forma típica da impedância equivalente, vista de um dado barramento, em função da frequência, é o apresentado na Figura 4.1^[11].

Tal comportamento se justifica devido à complexa topologia do sistema, onde se conta com a presença de indutâncias e capacitâncias, além, logicamente, de resistências, em configurações capazes de originar ressonâncias em determinadas frequências.

A Figura 4.2 traduz a mesma informação da Figura 4.1, em um espectro de frequências.

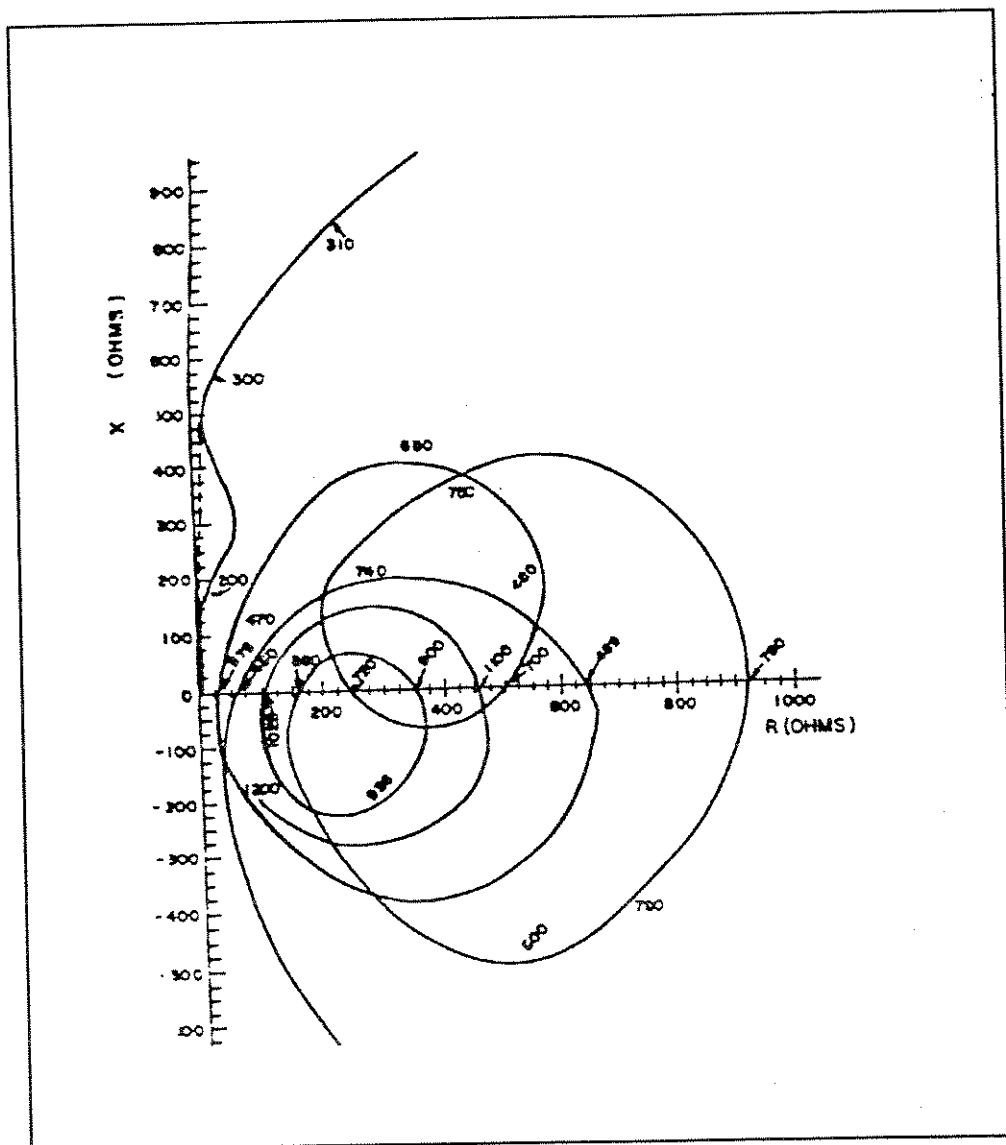


Figura 4.1- DIAGRAMA POLAR DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE UM SISTEMA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

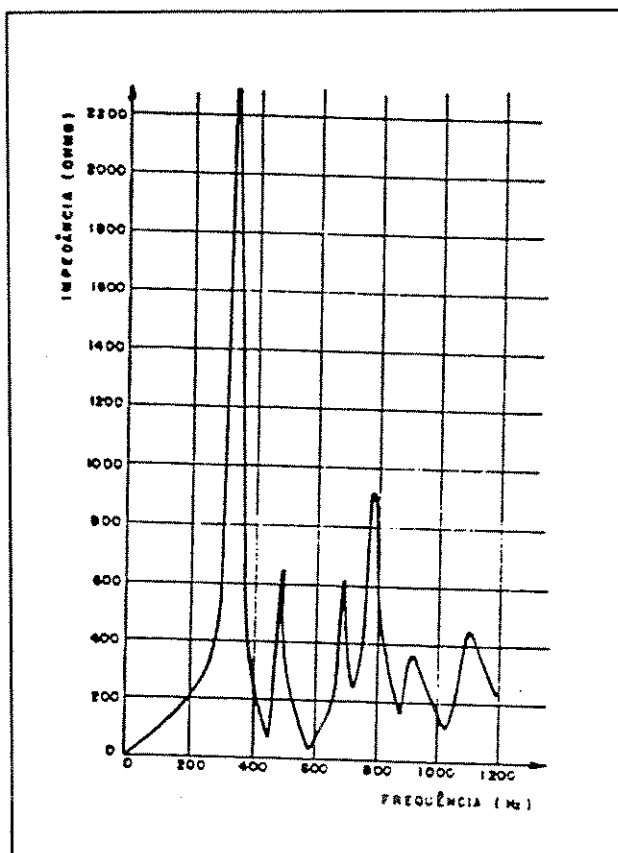


Figura 4.2 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS CORRESPONDENTE AO SISTEMA DA FIGURA 4.1

Basicamente existem dois métodos de se obter os diagramas das Figuras 4.1 e 4.2. O primeiro método se dá através de medições de campo e o segundo através da simulação digital e/ou analógica do sistema em questão. Ambos os métodos têm restrições quanto à sua aplicação. O primeiro deles supõe a existência física do sistema, enquanto o segundo implica na utilização de modelos adequados para cada um de seus componentes na faixa de frequências de interesse. No entanto, o segundo método é o mais adequado a nível de planejamento, e neste sentido muitos trabalhos tem sido desenvolvidos [11,17,18,19,20].

São apresentados a seguir, os modelos de componentes de sistemas elétricos, baseados na literatura especializada, que foram considerados na implementação deste trabalho.

4.2 - MODELOS DE COMPONENTES

• LINHAS E CABOS

No domínio da frequência, uma porção infinitesimal de uma linha de transmissão uniforme pode ser genericamente representada pelo circuito equivalente mostrado pela figura abaixo^[21].

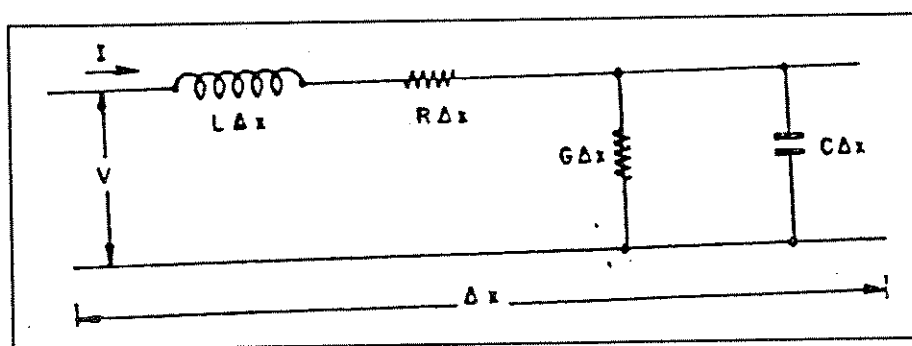


Figura 4.3 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA PORÇÃO INFINITESIMAL DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO UNIFORME NO DOMÍNIO DO TEMPO

Conforme a referência^[18], linhas e cabos em estudos envolvendo frequências harmônicas, podem ser representados por um equivalente π compreendendo uma resistência e uma reatância indutiva em série, inseridos entre ambos os pontos da rede e fechados por dois capacitores conectados entre estes pontos e o ponto de referência (terra), conforme mostra a Figura 4.4.

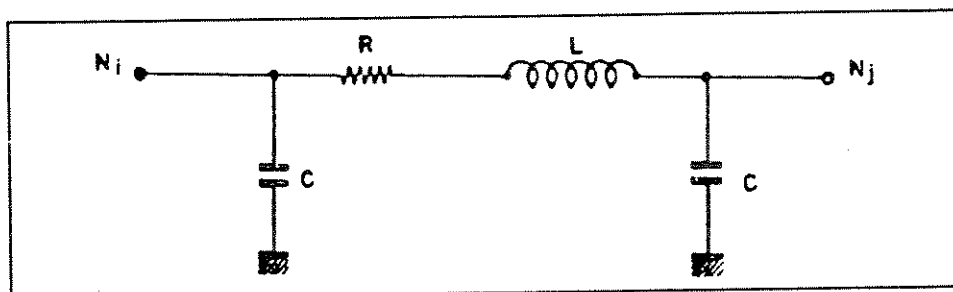


Figura 4.4 - CIRCUITO π EQUIVALENTE PROPOSTO NA REFERÊNCIA^[18] PARA LINHAS E CABOS

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

• TRANSFORMADORES

A representação mais simples de um transformador é aquela na qual considera-se apenas a indutância de dispersão, facilmente calculada a partir dos dados de placa do transformador (reatância em p.u.) e a resistência dos enrolamentos, cuja representação por fase é mostrada na Figura 4.5.

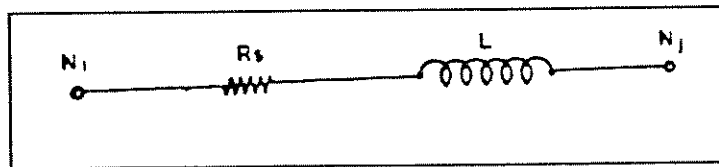


Figura 4.5 - MODELO DE TRANSFORMADORES

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

No entanto, valores típicos de resistência ôhmica dos enrolamentos de transformadores estão na faixa de 0,2 a 1,5% e são representados na Figura 4.6 [20]

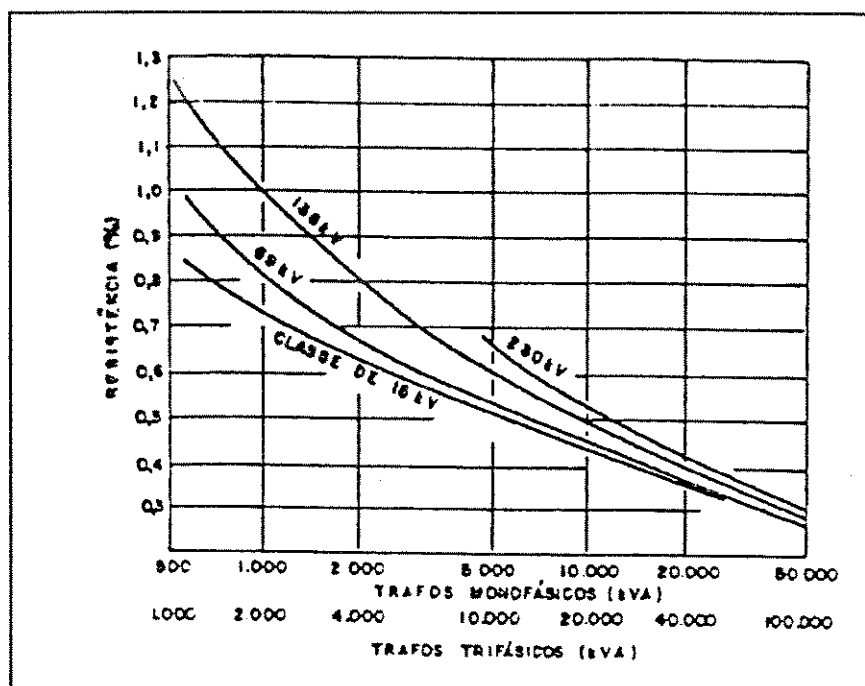


Figura 4.6 - RESISTÊNCIA PERCENTUAL DE TRANSFORMADORES COM REFRIGERAÇÃO PRÓPRIA, IMERSOS EM ÓLEO

Apesar deste modelo ser mais adequado para problemas à frequência fundamental ou para descrever o comportamento de transformadores à baixas frequências ^[21], este foi o modelo adotado na implementação do programa.

• CARGAS

Há consideráveis variações na impedância do sistema com a frequência e com o nível de carregamento, tanto para consumidores domésticos, quanto para industriais. No entanto, como normalmente são as cargas industriais as que se utilizam de capacitores para compensação do fator de potência, são elas que apresentam grande possibilidade de contribuir para a ocorrência de ressonâncias série e/ou paralela no sistema elétrico.

No estudo de fluxo harmônico, não é usual representar as cargas de baixa potência individualmente; elas são geralmente combinadas em circuitos equivalentes que melhor representem as características de impedância do conjunto de cargas ^[22].

Estas cargas são fontes de frequências harmônicas. Deste modo, elas não podem ser modeladas através de parâmetros constantes R , L ou C , ou seja, elas apresentam características não-lineares e portanto não podem ser incluídas em um circuito equivalente de impedâncias.

A Tabela 4.1 a seguir, mostra que existem basicamente dois tipos de cargas: as resistivas e os motores. Isto implica numa simples combinação de resistências e indutâncias. Entretanto a dificuldade de se obter informações detalhadas sobre a composição exata, potências envolvidas e variações com o tempo torna complexo o estabelecimento de um modelo equivalente.

Para a implementação deste trabalho, as cargas são expressas por suas potências ativa e reativa, as quais são utilizadas para calcular a impedância equivalente para estudos de fluxo de carga à frequência fundamental, partindo-se da tensão nominal.

Tabela 4.1 - COMPOSIÇÃO DE CARGAS

Natureza	Tipo de Carga
Doméstica ou Comercial	Lâmpadas incandescentes Ar condicionado Aquecimento Resistivo Exaustores Refrigeradores Máquinas de Lavar Lâmpadas Fluorescentes Televisores Outras cargas Eletrônicas
Industrial	Ventiladores Bombas Compressores Aquecimento Resistivo Solda Fornos a Arco Ferrovias Cargas Eletrônicas

• MOTORES DE INDUÇÃO

A modelagem do motor de indução para frequências harmônicas obedece basicamente o modelo convencional, para a frequência industrial.

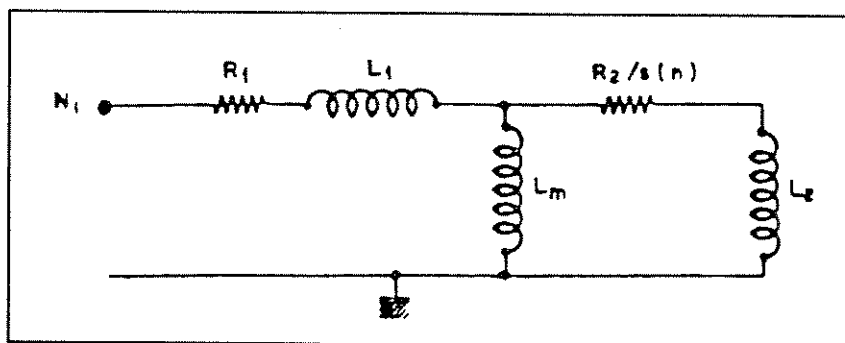


Figura 4.7 - MODELO 1 PARA MOTORES DE INDUÇÃO

O escorregamento para frequências harmônicas é dado por:

$$s(n) = \frac{n \pm [1 - s(1)]}{n} \quad (4.1)$$

onde: $s(1)$ = escorregamento à frequência fundamental, sendo que o escorregamento harmônico $s(n)$ apresenta valor típico muito próximo da unidade.

Neste modelo, a reatância de magnetização, $X_m = \omega L_m$ pode ser negligenciada quando sujeita à frequências harmônicas. Deste modo, o modelo apresentado na Figura 4.7 pode ser a representação de um motor sujeito à frequências harmônicas.

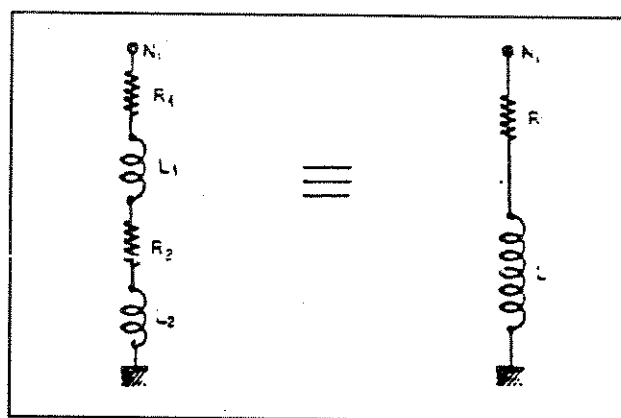


Figura 4.8 - MODELO 2 PARA MOTORES DE INDUÇÃO

No modelo 2, L é a indutância de rotor travado, a qual pode ser calculada a partir das condições de partida, enquanto que R é a resistência de amortecimento, a qual é derivada das perdas do rotor.

• MÁQUINAS SÍNCRONAS

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

Eventualmente, uma combinação série de R e L pode ser utilizada como mostra a Figura 4.9.

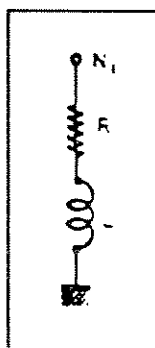


Figura 4.9 - MODELO PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

• FILTROS

Numa tentativa de se mitigar o nível das distorções harmônicas nas barras de um sistema de potência, podem ser instalados filtros sintonizados. Por exemplo, no caso específico de distorções devido à conversores, tem-se, em barramentos de média tensão com potência menor que 30MW de conversores, um arranjo com filtros de 5ª e 7ª ordem mais um ramo passa-alta. Para potências maiores que 30MW, além destes podem ser instalados filtros de 11ª e 13ª ordens^[9].

Deste modo, existem basicamente dois modelos de filtros. Um modelo para filtros sintonizados e um outro para filtro passa-alta.

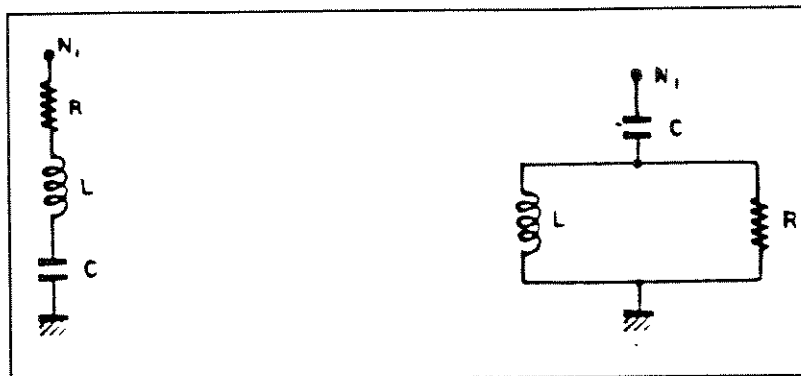


Figura 4.10 - MODELOS PARA FILTROS (1- SINTONIZADOS II- PASSA-ALTA)

Estes modelos devem ser utilizados para formar o arranjo de filtros instalado em um certo ponto do sistema.

• CAPACITORES

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

Em ambos os casos, para estudos de penetração harmônica, o capacitor deve ser representado simplesmente por sua capacitância equivalente, sendo seu modelo convenientemente inserido no sistema.

Um fato que deve ser lembrado é a criação de mais um nó na matriz Z_{bus} , no caso de compensação série. A Figura 4.11 traz os modelos de capacitores nas duas situações previstas neste trabalho.

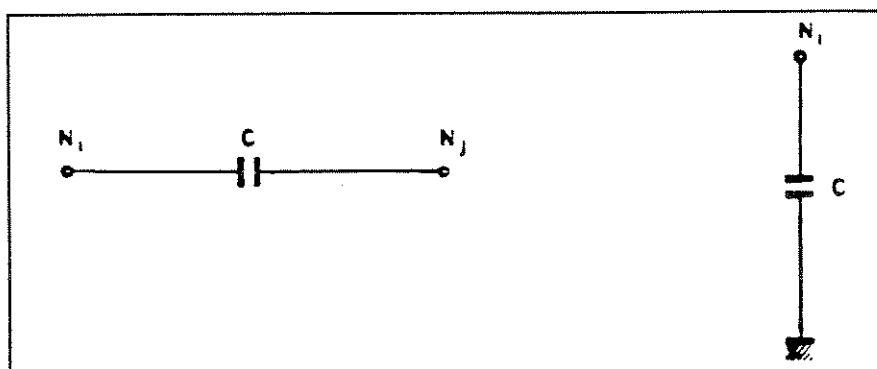


Figura 4.11 - MODELOS DE CAPACITORES (COMPENSAÇÃO: I- SÉRIE II- PARALELA)

• REATORES

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

Os de núcleo em material magnético são usualmente ligados como componentes em paralelo, enquanto que os com núcleo de ar são conectados como elementos série para limitação de corrente de falta. Normalmente, nos dois casos, o reator pode ser representado por um ramo RL série conforme a Figura 4.12.

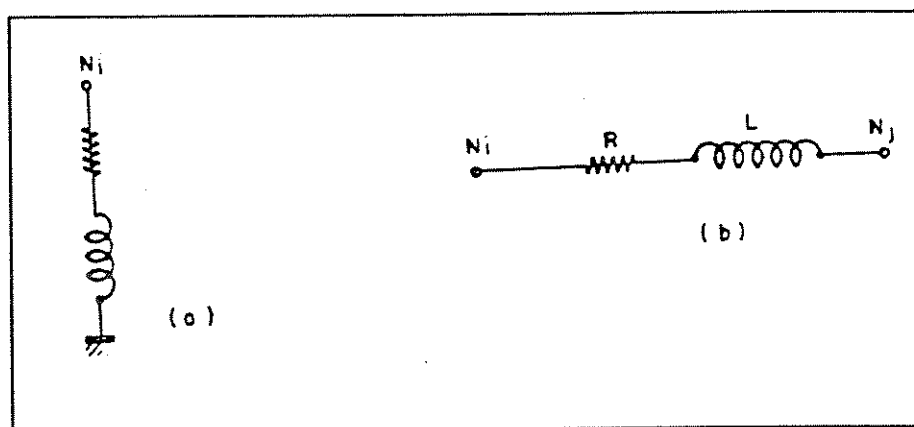


Figura 4.12 - MODELOS PARA REATORES (a - PARALELO b - SÉRIE)

• EQUIVALENTES DE SISTEMA

O modelo adotado para equivalentes de sistema é baseado na representação da impedância equivalente por sua reatância de curto-circuito corrigida para as frequências harmônicas.

Este modelo resulta em:

$$|Z_n| = \frac{V^2}{S_{sc}} n \quad (4.2)$$

$$\phi_n = 90^\circ \text{ para qualquer } n$$

onde:

- $|Z_n|$ = módulo da impedância harmônica equivalente
- ϕ_n = ângulo da impedância harmônica equivalente
- V = tensão eficaz do barramento
- S_{sc} = potência de curto circuito do barramento
- n = ordem harmônica

Apesar da diversidade e, até mesmo, da complexidade de modelos de componentes de sistemas propostos para o estudo de sistemas sujeitos à cargas não-lineares, a escolha dos modelos mais simples deve-se ao fato de que o método proposto neste trabalho deverá ser encarado apenas como um pré-diagnóstico das distorções harmônicas de tensão que poderão surgir e que poderá fornecer portanto, uma indicação segura a cerca da ultrapassagem, ou não, dos limites harmônicos estabelecidos nas barras do sistema.

CAPÍTULO 5

MÉTODO PROPOSTO: IMPLEMENTAÇÃO, SIMULAÇÃO E RESULTADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo propõe um método computacional para avaliação de distorções harmônicas em sistemas de potência, tendo como base o conteúdo harmônico em regime permanente, e em condições normais de operação, no lado c.a. de uma instalação conversora trifásica. A escolha da instalação conversora trifásica controlada como carga não-linear típica se justifica frente a incidência deste tipo de carga nos SEP's.

A consideração da operação sob condições normais, como definidas no Capítulo 4, implica na eliminação, nesse estudo, da geração de harmônicas não-características, possibilitando o tratamento do sistema analisado através de uma de suas fases, desprezando o acoplamento magnético entre fases.

5.2 - MÉTODO PROPOSTO

Um sistema de potência genérico, simétrico e equilibrado pode ser representado através de uma de suas fases. O procedimento geral para a obtenção da matriz $[Z_{bus}]$, desenvolvido originalmente para ser utilizado em cálculos de fluxo de carga à frequência fundamental^[23], pode ser utilizado para outras frequências, e em particular para as frequências harmônicas.

Assim, uma vez escolhidos os modelos a serem utilizados para representar os componentes do sistema de potência, ficam definidas as impedâncias próprias dos ramos bem como das eventuais mútuas existentes no sistema para cada frequência harmônica, ou seja, a definição da matriz impedância primitiva de ramos para cada ordem harmônica, $[Z_{prim}(n)]$, onde n define a ordem harmônica em questão.

Deste modo, define-se a matriz impedância das barras para cada harmônica como:

$$[Z_{bus(n)}] = [Y_{bus(n)}]^{-1} \quad (5.1)$$

As tensões e correntes nas barras do sistema se relacionam pela expressão:

$$\vec{V}(n) = [Z_{bus(n)}] * \vec{I}(n) \quad (5.2)$$

onde:

$\vec{I}(n)$ = vetor das injeções de correntes harmônicas de ordem n nas barras do sistema.

$\vec{V}(n)$ = vetor das tensões harmônicas de ordem n nas barras do sistema.

Tomando-se os conversores estáticos como representantes típicos de fontes geradoras de frequências harmônicas e considerando-se a operação sob condições ideais, pode-se estabelecer uma uniformidade nas injeções harmônicas de corrente, assumindo-se que cada componente de injeção harmônica pode ser expressa como uma função da componente fundamental de injeção de corrente. Assim, tem-se em módulo:

$$I(n) = \frac{I(1)}{n} \quad (5.3)$$

Partindo-se do princípio de que o objetivo do método desenvolvido é determinar qual (ou quais) a(s) barra(s) mais sensível(is) a uma perturbação harmônica presente em qualquer barra do sistema, sendo portanto, uma análise mais qualitativa do que quantitativa, justifica-se o fato de se considerar as respectivas injeções harmônicas de corrente de uma forma normalizada. Assim, tem-se para a corrente fundamental de um conversor instalado, de seis pulsos, na barra k do sistema:

$$I_k(1) = 1,0 \text{ p.u.} \quad (5.4)$$

e para a componente de injeção harmônica:

$$I_k(n) = \frac{1,0}{n} \text{ p.u.} \quad (5.5)$$

onde $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$

Analogamente, pode-se adotar um valor normalizado para a componente fundamental de tensão de cada uma das barras do sistema a ser analisado, justificando-se esta medida pelo fato de que em situações reais as barras de um SEP apresentam estados muito próximos a 1.0 p.u., ou seja:

$$V_k(1) = 1,0 \text{ p.u.} \quad (5.6)$$

Para se alcançar os objetivos desejados, faz-se necessário, como ponto de partida, a utilização de um fator que quantifique, de um modo geral, o grau de distorção de tensão presente nas barras de um sistema elétrico. Este fator, bastante conhecido na literatura ^[13], fornece a influência a que cada barra está sujeita, no que diz respeito às frequências harmônicas presentes no sistema. Tal fator é o **Fator de Distorção Harmônica Total de Tensão (FDT)**, definido para cada barra k de um sistema elétrico e descrito como a seguir:

$$FDT_K = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_k(n))^2}}{V_k(1)} \quad (5.7)$$

onde:

- k = barra genérica do sistema
- n = ordem harmônica
- $V_k(n)$ = tensão eficaz de ordem n da barra k
- $V_k(1)$ = tensão eficaz fundamental da barra k

Como pode ser observado, os valores de FDT_K dependem da determinação prévia das diferentes tensões harmônicas e da tensão fundamental para a barra considerada.

A avaliação das tensões harmônicas em todas as barras de um sistema de m barras, dadas pela expressão (5.2), pode ser estendida para o caso particular de uma única fonte harmônica instalada na barra j como:

$$\begin{bmatrix} V_1(n) \\ \vdots \\ V_j(n) \\ \vdots \\ V_m(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(n) & \cdots & Z_{1j}(n) & \cdots & Z_{1m}(n) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{j1}(n) & \cdots & Z_{jj}(n) & \cdots & Z_{jm}(n) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1}(n) & \cdots & Z_{mj}(n) & \cdots & Z_{mm}(n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_j(n) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Neste caso, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_1(n) \\ \vdots \\ V_j(n) \\ \vdots \\ V_m(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1j}(n) * I_j(n) \\ \vdots \\ Z_{jj}(n) * I_j(n) \\ \vdots \\ Z_{mj}(n) * I_j(n) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Assim, se a única fonte de harmônicas estiver na barra j , o fator FDT_k dado pela expressão (5.7) passa a ser:

$$FDT_k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (Z_{kj}(n) * I_j(n))^2}}{V_k(1)} \quad (5.10)$$

Levando-se em conta as hipóteses contidas em (5.3), (5.4), (5.5) e (5.6), tem-se:

$$FDT_k = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{Z_{kj}(n)}{n} \right)^2} \quad (5.11)$$

A expressão (5.11) traduz a distorção total de tensão da barra k quando se tem um conversor ideal de seis pulsos conectado à barra j com uma injeção de corrente fundamental de 1,0 p.u..

Deste modo, o Fator de Distorção Harmônica Total de Tensão obtido em (5.11) passa a receber a denominação de **Fator Relativo de Distorção Harmônica de Tensão (FRDHT)**; ou seja:

$$FRDHT_{kj} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{Z_{kj}(n)}{n} \right)^2} \quad (5.12)$$

Assim, tais fatores podem ser avaliados a partir das matrizes $[Z_{bus}(n)]$ expressas em p.u., podendo ser agrupadas de forma matricial, de modo a revelar as prováveis distorções presentes no sistema. Os elementos desta nova matriz $F(m \times m)$, de Fatores Relativos, indicarão a porcentagem da distorção harmônica total de tensão causada na barra i decorrente da presença de um conversor instalado na barra j , e proporcionalmente ao porte do conversor, uma vez que a matriz está normalizada para 1,0 p.u. de corrente fundamental.

Deste modo, se para um sistema, $F_{34} = 5\%$, a distorção harmônica total de tensão da barra 3 devido à instalação de um conversor ideal de seis pulsos na barra 4, com uma corrente fundamental de 0,5 p.u. será de apenas 2,5%.

Observa-se, facilmente, que se for levada em conta a presença de injeção harmônica em apenas uma barra do sistema, necessita-se de informações de apenas uma coluna da matriz $[Z_{bus}(n)]$ para a obtenção das distorções de tensão de cada barra do sistema, uma vez que para as demais barras, as injeções harmônicas são nulas. O processo pode ser repetido, variando-se a posição da carga não-linear, a fim de se analisar a influência que esta exerceria sobre as demais, em função da sua localização.

5.2.1 - FILOSOFIA DE ANÁLISE PARA VÁRIAS FONTES HARMÔNICAS

Uma vez que cada injeção tem além de seu módulo um ângulo de fase, o nível da distorção harmônica em um sistema sujeito a, por exemplo, duas fontes harmônicas estaria na faixa compreendida entre a soma e a diferença das distorções obtidas para cada uma das fontes. Obviamente, um tratamento estatístico para o caso da presença de múltiplas fontes no sistema seria necessário para se avaliar o nível mais provável da distorção resultante; no entanto, este não é o objetivo do presente trabalho.

5.3 - IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

De posse dos dados que representem os componentes de um sistema elétrico sujeito a presença de cargas não-lineares, a forma mais utilizada para a obtenção das tensões harmônicas presentes neste sistema, advém da solução da expressão (5.2).

Para cada ordem harmônica a ser considerada no sistema uma equação matricial do tipo mostrado por esta expressão deve ser solucionada.

Seja o sistema genérico ilustrado na Figura 5.1:

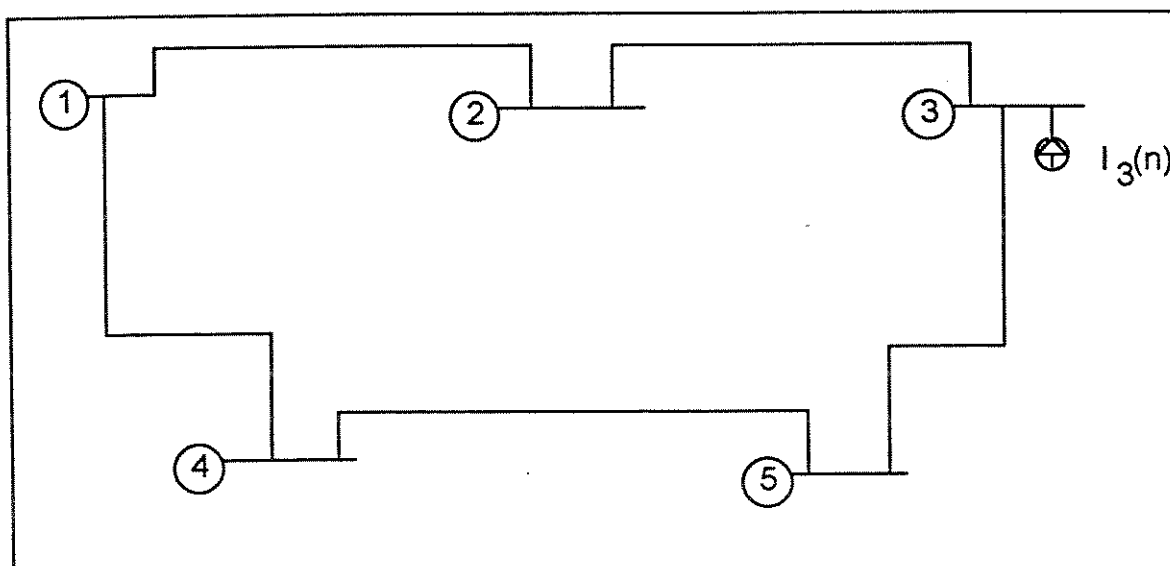


Figura 5.1 - DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA ELÉTRICO GENÉRICO COM 5 BARRAS

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1(n) \\ \dot{V}_2(n) \\ \dot{V}_3(n) \\ \dot{V}_4(n) \\ \dot{V}_5(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(n) & Y_{12}(n) & 0 & Y_{14}(n) & 0 \\ Y_{21}(n) & Y_{22}(n) & Y_{23}(n) & 0 & 0 \\ 0 & Y_{32}(n) & Y_{33}(n) & 0 & Y_{35}(n) \\ Y_{41}(n) & 0 & 0 & Y_{44}(n) & Y_{45}(n) \\ 0 & 0 & Y_{53}(n) & Y_{54}(n) & Y_{55}(n) \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \dot{I}_1(n) \\ \dot{I}_2(n) \\ \dot{I}_3(n) \\ \dot{I}_4(n) \\ \dot{I}_5(n) \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Efetuada-se a inversão da matriz $[Y_{bus}(n)]$ considerando-se uma instalação conversora apenas na barra 3 e levando-se em conta as hipóteses contidas em (5.5), temos:

$$\begin{bmatrix} V_1(n) \\ V_2(n) \\ V_3(n) \\ V_4(n) \\ V_5(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(n) & Z_{12}(n) & Z_{13}(n) & Z_{14}(n) & Z_{15}(n) \\ Z_{21}(n) & Z_{22}(n) & Z_{23}(n) & Z_{24}(n) & Z_{25}(n) \\ Z_{31}(n) & Z_{32}(n) & Z_{33}(n) & Z_{34}(n) & Z_{35}(n) \\ Z_{41}(n) & Z_{42}(n) & Z_{43}(n) & Z_{44}(n) & Z_{45}(n) \\ Z_{51}(n) & Z_{52}(n) & Z_{53}(n) & Z_{54}(n) & Z_{55}(n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

onde o termo $1/n$ referente a corrente harmônica de ordem n da barra 3 ocupa a linha 3.

Uma vez efetuados os cálculos que determinam as magnitudes relativas das tensões em cada barra, referentes a cada ordem harmônica considerada, pode-se calcular os respectivos Fatores Relativos de Distorção Harmônica de Tensão.

A avaliação da matriz $F(5 \times 5)$ dos fatores relativos de distorção total de tensão para este caso é obtida supondo que k varia de 1 a 5.

5.4 - ESTRUTURA DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para obtenção da análise qualitativa descrita neste capítulo, foi desenvolvido um programa computacional de acordo com o seguinte algoritmo:

- AQUISIÇÃO DE DADOS

Através de um arquivo previamente elaborado, são incorporados à estrutura do programa os dados que representam o sistema elétrico sob análise, classificados como a seguir:

- Dados Gerais

- a) Potência de base do sistema;
 - b) Frequência fundamental do sistema;
 - c) Ordem harmônica máxima a ser considerada;
 - d) Número de barras que compõem o sistema;
 - e) Número de linhas que compõem o sistema;
 - f) Número de transformadores;
 - g) Número de geradores;
 - h) Número de cargas instaladas nas barras;
 - i) Número de motores de indução;
 - j) Número de máquinas síncronas;
 - k) Número de filtros;
 - l) Número de capacitores série;
 - m) Número de capacitores shunt;
 - n) Número de reatores série;
 - o) Número de reatores shunt;
 - p) Número de equivalentes de sistema.

- Dados específicos

Para cada componente listado anteriormente, presente no sistema, são armazenadas informações que descrevem sua localização no sistema, bem como parâmetros que constituem os modelos para sua representação.

• MONTAGEM DA MATRIZ $[Y_{BUS(N)}]$

Utilizando as técnicas de armazenamento propostas pela referência [2,23], são obtidas tantas matrizes $[Y_{bus}]$ quantas forem as ordens harmônicas a serem consideradas de acordo com a expressão (5.1), por se considerar como cargas não-lineares apenas conversores estáticos de seis pulsos com operação sob condições ideais.

• CÁLCULO DA MATRIZ $[Z_{BUS(N)}]$

A obtenção das matrizes $[Z_{bus(n)}]$ é realizada pela simples inversão direta de cada matriz $[Y_{bus(n)}]$, uma vez que o objetivo central não se constitui da análise ou experimentação de técnicas modernas de Armazenamento Compacto ou semelhantes.

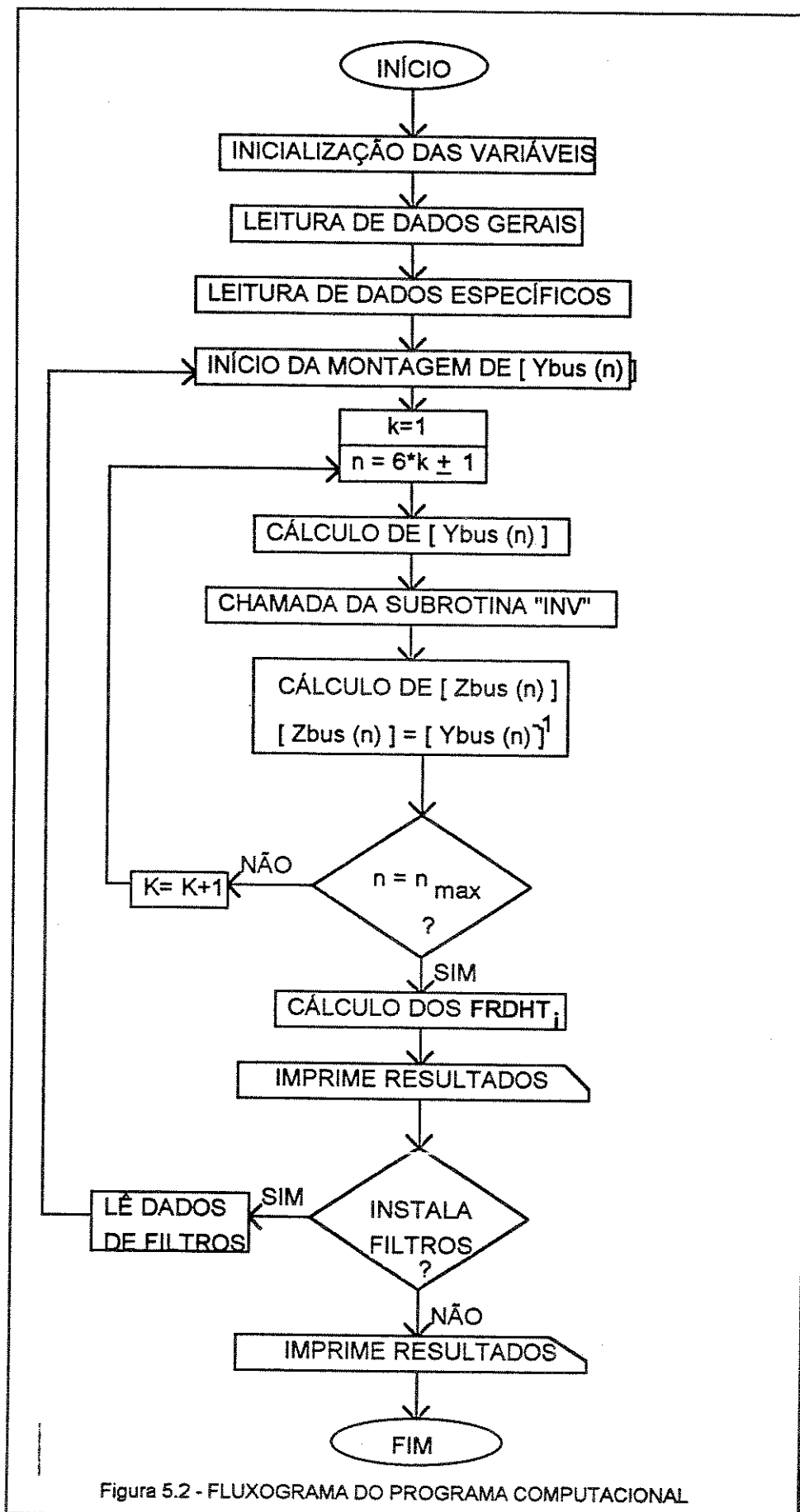
• CÁLCULO DOS FATORES RELATIVOS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO (FRDHT)

Para a obtenção destes fatores, como descrito pela expressão (5.12) faz-se necessário a definição de quais barras serão consideradas como injetoras de corrente harmônica. Esta definição pode ser realizada previamente, via arquivo, ou mediante interface com o usuário durante a execução do programa.

• INSTALAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS

Depois de calculados os Fatores Relativos de Distorção Harmônica de Tensão, na tentativa de simular a mitigação dos efeitos causados pelas injeções de correntes harmônicas, é simulada a instalação de filtros passivos e posteriormente são efetuados os cálculos para a obtenção de novos Fatores Relativos de Distorção Harmônica de Tensão.

A localização da instalação dos filtros pode ser pré-determinada, estando vinculada à localização das fontes injetoras de ordens harmônicas, ou estabelecidas pelo usuário após análise dos Fatores de Distorção calculados anteriormente a instalação destes. A seguir, será apresentada a estrutura computacional do programa desenvolvido.



5.5 - SISTEMA SIMULADO

Como exemplo de aplicação do método, utilizou-se um sistema já estudado, presente na referência^[13]. Trata-se de um sistema tipicamente industrial de oito barras, que apresenta um conversor de seis pulsos como fonte de injeções harmônicas.

A seguir, tem-se o diagrama unifilar desse sistema representado na Figura 5.3, bem como os dados das linhas desse sistema de maneira tradicional como são utilizados em fluxos de carga à frequência industrial por concessionárias de energia elétrica.

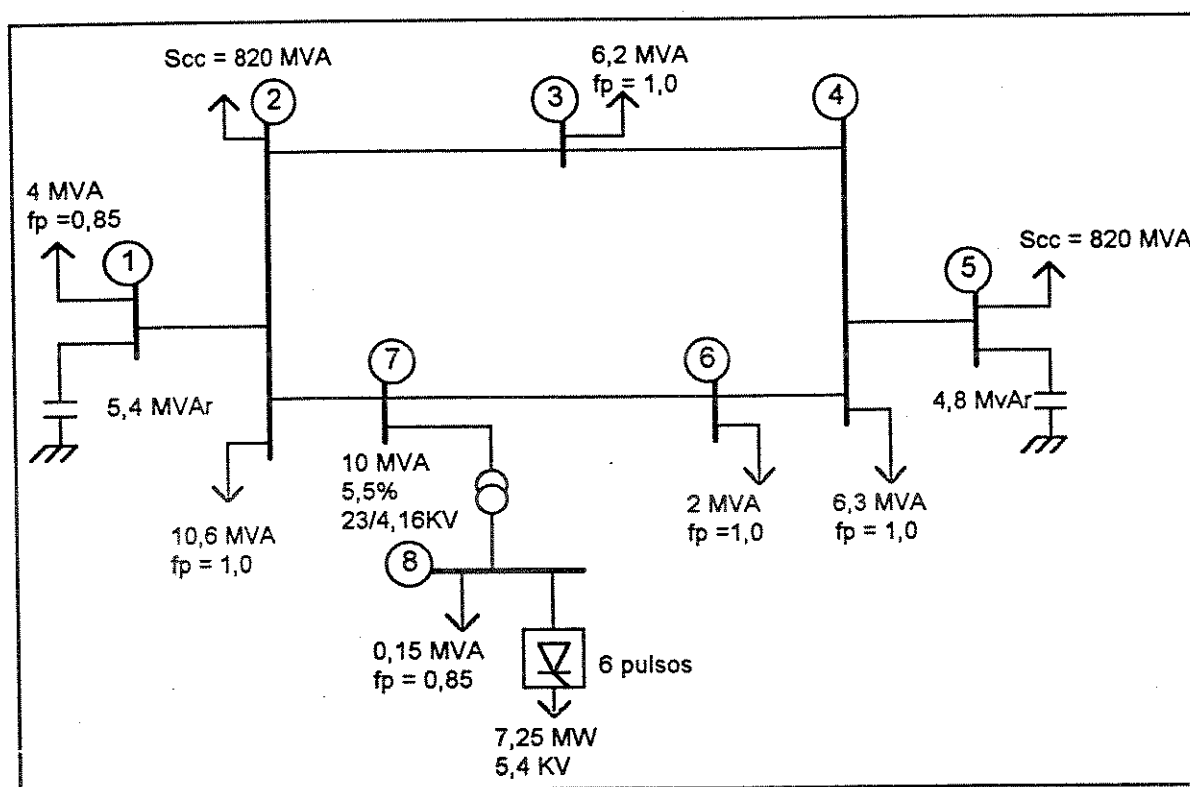


Figura 5.3 - DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA DE OITO BARRAS

Tabela 5.1 - DADOS DAS LINHAS DO SISTEMA

Linha	R (%)	Xl (%)	Bshunt (MVar)
1 - 2	0,1659	0,9471	0,00000177
2 - 3	1,3242	2,8009	0,00000060
2 - 7	0,5339	1,1294	0,00000148
3 - 4	0,2204	0,2615	0,00015591
4 - 5	1,8310	5,2778	0,00000032
4 - 6	0,2178	0,2585	0,00015772
6 - 7	0,8579	1,8145	0,00000092

Nota: Bases - 10 MVA/23KV

5.5.1 - CONSIDERAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO

Será apresentado aqui, um paralelo comparativo entre as condições adotadas para o sistema simulado por este trabalho e pela referência principal ^[13].

MÉTODO PROPOSTO

As condições adotadas para o sistema durante a aplicação do método são as seguintes:

- sistema simétrico e equilibrado;
- representação de todo o sistema c.a. através de apenas uma fase;
- componentes fundamentais de tensão iguais a 1,0 p.u.;
- componentes harmônicas de corrente tais como descrito na expressão (5.5).

MÉTODO ITERATIVO/INTERATIVO: PCFHSP

O procedimento adotado por este programa para a apresentação dos resultados computacionais da simulação do sistema da Figura 5.3 segue a seguinte estratégia:

Para a definição das tensões fundamentais iniciais, adotou-se o resultado obtido de um fluxo de carga, no qual foram incluídas as cargas não-lineares presentes.

Assumiu-se a barra 2 como barra de referência, a barra 5 como barra PV e as demais como barras PQ. Nestas condições, estimou-se inicialmente um fluxo de carga fundamental sem considerar o conversor na barra oito.

A desconsideração do conversor, que no caso consome 7,25MW para um sistema cuja somatória das demais cargas não atinge 30MW, parece ser uma aproximação grosseira. Assim, utilizando-se os dados do conversor, foi assumido um modelo para frequência fundamental. Este modelo foi avaliado conforme mostrado a seguir.

Sendo a tensão média do lado c.c. do conversor é dada por:

$$V_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_m \cos \alpha \quad (5.15)$$

onde:

V_d = tensão média c.c.

E_m = tensão de pico fase-neutro do sistema

α = ângulo de disparo do conversor

No caso do sistema aqui considerado, a barra 8 tem uma tensão nominal de linha igual a 4160V, ou seja, $E_m = \frac{4160}{\sqrt{3}} \sqrt{2}$ v, e sendo $V_d = 5417$ V (proveniente de um rebatimento de uma tensão contínua de 625 V ligado a um trafo de secundário igual a 480 V de linha), então: $\alpha = 15,38^\circ$.

Deste modo, assume-se, para fins de fluxo de carga à frequência fundamental um modelo para o conversor da barra 8 como uma carga passiva com potência complexa de:

$$S_{conv} = [7,25 + j1,995025] MVA \quad (5.16)$$

o que corresponde a uma corrente fundamental de cerca de 0,75 p.u. na base adotada de 10 MVA.

Sendo a carga total da barra 8 de:

$$S_8 = [7,3775 + j2,074042] MVA \quad (5.17)$$

5.6 - RESULTADOS OBTIDOS

Apesar do sistema da Figura 5.3 ter uma fonte harmônica conectada na barra 8, o método aqui proposto permite avaliar as prováveis distorções harmônicas de tensão em todo o sistema utilizando-se apenas a parte linear do mesmo, e supondo-se um único conversor estático ideal de seis pulsos localizado separadamente em cada uma das barras do sistema.

Deste modo, a Tabela 5.2 apresenta os Fatores Relativos de Distorção Harmônica Total de Tensão obtidos.

Tabela 5.2 - FATORES RELATIVOS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO EM VALORES PERCENTUAIS

Barra sob análise	Conversor na Barra							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	7,60	4,04	3,53	3,49	1,68	3,53	3,83	3,83
2	4,04	2,41	2,03	2,00	0,61	2,03	2,26	2,26
3	3,53	2,03	4,64	4,26	1,60	4,05	2,62	2,61
4	3,49	2,00	4,26	4,52	1,74	4,28	2,66	2,66
5	1,68	0,61	1,60	1,74	7,53	1,61	0,77	0,77
6	3,53	2,01	4,05	4,28	1,61	4,67	2,81	2,81
7	3,83	2,26	2,62	2,66	0,77	2,81	3,89	3,89
8	3,83	2,26	2,61	2,66	0,77	2,81	3,89	18,97

A Tabela 5.3 a seguir apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto e os resultados presentes na referência^[13], considerando o conversor presente apenas na barra 8. Nesta tabela, a coluna identificada por FDTi representa o nível de distorção harmônica total de tensão da barra i, $i=1,2,3,\dots,8$, calculado pela referência^[13] onde considerou-se que o conversor apresenta uma componente fundamental de corrente da ordem de 0,75 p.u., ao passo que a coluna identificada por Fi,8 representa o "nível" de distorção harmônica de tensão da barra i, referente à instalação do conversor na barra 8, calculado pelo método aqui proposto, considerando-se que o conversor apresenta uma componente fundamental de corrente igual a 1 p.u.

Tabela 5.3 - FDT_i & $F_{i,8}$

Barra	FDT_i (%) ^[13]	$FRDHT_{i,8}$ (%)
1	2,88	3,83
2	1,70	2,26
3	1,96	2,61
4	2,00	2,66
5	0,58	0,77
6	2,11	2,81
7	2,93	3,89
8	14,26	18,97

Analisando-se a Tabela 5.3 anterior, nota-se uma marcante coerência dos resultados obtidos em relação aos presentes na referência^[13], que pode ser comprovada verificando-se a relação existente entre dois fatores correspondentes a uma mesma barra. Por exemplo, a relação existente entre os fatores da barra 1:

$$FDT_1 / F_{1,8}$$

é de 0,75.

Esta relação se repete para as demais barras, e que neste caso representa a mesma relação existente entre as componentes fundamentais de corrente do conversor utilizadas nos dois métodos.

Em se tratando de níveis ou limites de distorção, os resultados obtidos por este trabalho levam às mesmas conclusões já documentadas na referência^[13].

Observando-se apenas o limite de 5% para o fator de distorção harmônica total de tensão, pode-se concluir que no sistema simulado, apenas a barra 8 não se enquadra neste limite, para o caso de se ter o conversor instalado na referida barra, sendo desejável alguma providência. Por outro lado, as barras que apresentam os menores fatores de distorção harmônica total de tensão seriam as barras 5 e 2.

Uma situação de alto fator de distorção harmônica de tensão na barra 8, de acordo com a sugestão presente na referência^[13], foi simulada duplicando-se a reatância de dispersão do trafo localizado entre as barras 7 e 8, ou seja, a reatância de dispersão deste trafo que é de 5,5% foi considerada 11%.

A Tabela 5.4 apresenta os fatores encontrados pela referência^[13] e o trabalho aqui proposto, respectivamente.

Tabela 5.4 - RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DE UM ALTO FATOR DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO - PCFHSP & TRABALHO PROPOSTO

Barra	FDT _i (%)	FRDHT _{i,8} (%)
1	2,87	3,83
2	1,70	2,26
3	1,98	2,60
4	2,02	2,68
5	0,58	0,79
6	2,12	2,83
7	2,94	3,89
8	26,58	35,44

Uma análise da tabela 5.4 mostra praticamente os mesmos fatores relativos de distorção harmônica total de tensão para todas as barras do sistema, exceto para a barra 8 que apresenta nesta última tabela um fator de distorção que é praticamente o dobro daquele apresentado pela Tabela 5.3.

A conclusão a que se chega aqui é a mesma apresentada pela referência^[13]; ou seja, tem-se uma situação de "ressonância" localizada na barra do conversor.

5.6.1 - INSTALAÇÃO DE FILTROS NA BARRA DO CONVERSOR

Uma vez que a maior distorção harmônica de tensão ocorre na barra 8, seguindo-se as recomendações para se mitigar as distorções harmônicas, simulou-se a instalação de filtros sintonizados para 5^a, 7^a, 11^a e 13^a harmônicas mais um ramo passa-alta.

A Tabela 5.5 a seguir apresenta os valores dos parâmetros dos filtros utilizados. A disposição destes filtros está representada na Figura 5.4.

Tabela 5.5 - VALORES DOS PARÂMETROS DOS FILTROS

FILTRO	R (ohms)	L (mH)	C (μ F)
11 ^a harmônica	0,1125000	11,2500	25,0
7 ^a harmônica	0,0731250	7,31250	19,6
13 ^a harmônica	0,0281250	2,81250	20,6
13 ^a harmônica	0,0208125	2,08125	20,0
passa - alta	1,7500000	0,65000	311,7

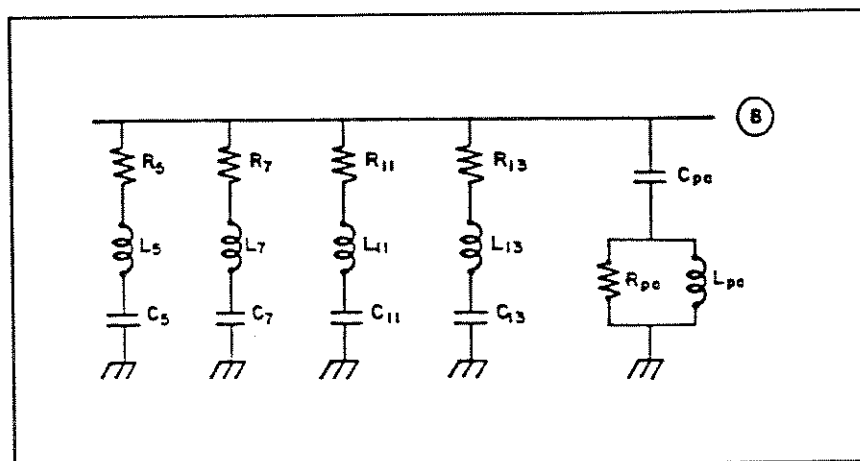


Figura 5.4 - DISPOSIÇÃO DOS FILTROS SINTONIZADOS E PASSA-ALTA INSTALADOS NA BARRA 8

Tabela 5.6-FATORES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO ENCONTRADOS PELO PCFHSP E PELO MÉTODO PROPOSTO, APÓS A INSTALAÇÃO DOS FILTROS NA BARRA 8

Barra	FDTi (%)	FRDHTi,8 (%)
1	0,31	0,41
2	0,27	0,35
3	0,48	0,63
4	0,50	0,66
5	0,13	0,17
6	0,54	0,71
7	0,81	1,07
8	4,55	6,03

Como mostra a Tabela 5.6, pode-se constatar que os fatores relativos de distorção realmente diminuíram em relação à situação inicial, sendo que a relação de cerca de 0,75 entre os fatores obtidos por^[13] e por este trabalho se mantém.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUJESTÕES

Esta dissertação, apresentou, em sua essência, a proposta de uma ferramenta computacional que através, apenas, da combinação adequada dos elementos das matrizes impedância de barra em função da ordem harmônica, conseguisse estabelecer quais as barras que maiores distorções de tensão apresentariam quando da instalação de uma carga não-linear em uma determinada barra de um sistema de energia elétrica, tornando possível, dessa forma, encontrar a localização mais adequada de uma carga não-linear dentro do sistema, em função da disponibilidade física desse sistema, a fim de se obter as menores distorções harmônicas de tensão.

Na elaboração deste trabalho, algumas considerações foram adotadas e poderiam representar restrições quanto a generalidade do método proposto. Dentre estas considerações, destacam-se:

I - SISTEMA TRIFÁSICO SIMÉTRICO E EQUILIBRADO

A normalização das componentes fundamentais das tensões em 1,0 p.u., bem como das componentes harmônicas de corrente como sendo uma fração da componente fundamental em função da ordem harmônica correspondente representam uma grande simplificação na implementação do método.

II - TRATAMENTO DO SISTEMA ATRAVÉS DE UMA DAS FASES

Há que se considerar as limitações impostas pelo tratamento monofásico, representando restrições quanto à flexibilidade de estudos, ressaltando que os resultados de análises vinculadas a sistemas elétricos ainda em fase de planejamento, não retratam todas as possibilidades operativas e seus efeitos subseqüentes.

III - MODELAMENTO DOS COMPONENTES DO SISTEMA EM ESTUDO

Os modelos utilizados para representação dos equipamentos que compõem o sistema simulado são os mais simples dentre os propostos pela literatura especializada.

Um bom exemplo é o modelo adotado para a representação de equivalentes de sistemas. Sem dúvida, este modelo pouco ou nada traduz sobre o comportamento do sistema em função das frequências harmônicas.

Se porventura, juntamente com a utilização deste modelo, houver a inclusão de um filtro na barra a qual estiver conectado este sistema, e se este filtro em uma determinada frequência harmônica apresentar um comportamento capacitivo, pode-se obter, eventualmente, uma grande tensão harmônica cuja magnitude não tem significado físico, uma vez que o modelo para equivalente de sistema é totalmente desvinculado do sistema real.

Estes modelos foram assim adotados, pois não se constitui como objetivo deste trabalho, avaliar o mérito ou a viabilidade de determinados modelos, mas sim, analisar a representatividade da metodologia aqui empregada, bem como dos resultados a que esta metodologia conduz.

Semelhante observação pode ser feita com relação aos filtros que foram implementados para que se pudesse analisar o comportamento do sistema mediante a sua instalação, tanto que a disposição aqui implementada foi a mesma proposta pela referência ^[13].

IV - REPRESENTAÇÃO DAS FONTES HARMÔNICAS

Com a representação das fontes geradoras de harmônicas por meio de fontes de corrente, o programa visa estudos de sistemas em fase de planejamento. Todavia, com a modelagem monofásica e com a consideração da presença, apenas, de harmônicas de ordens características, as fontes implementadas não permitem a avaliação dos níveis de corrente harmônicas sob condições operativas não-ideais.

Em contrapartida, cabe observar que o fato de se considerar o módulo de cada componente harmônica como sendo uma fração da componente fundamental injeção de corrente, em função da ordem harmônica, não prejudica a confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que causaria, na pior das hipóteses, apenas uma superestimativa dos níveis de distorção harmônica,, levando-se em conta que na prática, um conversor estático em operação real, apresenta um nível de injeção harmônica de corrente menor do que no caso ideal, como pode ser visto na Tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1 - CORRENTES HARMÔNICAS PRESENTES NA ENTRADA DE CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA (6 PULSOS) EM P.U. DA FUNDAMENTAL.

	Ordem Harmônica							
	5	7	11	13	17	19	23	25
Valores Teóricos	0,200	0,143	0,090	0,077	0,059	0,053	0,043	0,040
Valores Práticos	0,175	0,110	0,045	0,029	0,015	0,010	0,009	0,008

Por fim, levando-se em conta as simplificações e considerações adotadas por este trabalho, pode-se observar facilmente a estreita coerência entre os resultados aqui apresentados e os resultados pela referência principal, o Pacote Computacional Fortran para Harmônicas em Sistemas de Potência (PCFHSP), lembrando ainda, que este último possui em sua filosofia principal a implementação de um complexo método iterativo/iterativo para análise de harmônicas em sistemas de potência.

Deste modo, conclui-se que as simplificações adotadas tanto em relação ao sistema quanto às prováveis cargas não-lineares levou-nos a um método que, se não preciso, é revelador quanto aos níveis de distorção, permitindo a identificação das barras mais problemáticas, com a vantagem de ser muito mais rápido do que ferramentas mais complexas.

Por exemplo, o caso simulado pelo PCFHSP dispense de cerca de oito minutos de CPU do VAX cluster 4000 enquanto qualquer um dos resultados aqui apresentados, obtidos por este trabalho não leva mais do que o tempo de processamento da própria máquina.

A possibilidade do emprego de um tratamento estatístico como citado no item 5.2.1 deverá ser explorada. Neste sentido, no caso da presença simultânea de duas ou mais fontes harmônicas a estimativa da provável distorção harmônica deverá ser feita através de uma combinação adequada da matriz $F(m \times m)$ dos Fatores Relativos de Distorção Harmônica Total de Tensão obtida para apenas uma fonte.

Esta combinação adequada deverá ser conseguida a partir dos ângulos de fase estatisticamente razoáveis para as injeções harmônicas cujos módulos foram definidos pela expressão (5.5).

Devido a compatibilidade dos resultados obtidos, levando-se em conta o fato de que não foi considerado o efeito da comutação das válvulas, poderia ser concluído que o programa proposto pode substituir o Programa Computacional Fortran para Harmônicas em Sistemas de Potência (PCFHSP), para o caso de análise de sensibilidade para harmônicas características. Baseado neste fato, faz-se necessário uma posterior comparação com casos onde a influência da comutação seja considerada, sobretudo para o caso de aplicações industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Working Group; "Power System Harmonics: AN OVERVIEW", IEEE-PAS, vol. PAS-102, N° 8, Aug. 1983.
- [2] ARRILAGA, J. ; "Power System Harmonics", J. W. & Sons, Inc., 1985.
- [3] EMANUEL, A. E., YANG, M., PILEGGI, D. J.; "The Engineering Economics of Power Systems Harmonics in Subdistribution Feeders. A Preliminary Study", IEEE - Transactions on Power Systems, vol.6, N° 3, Aug. 1991.
- [4] PESONEN, M. A. et al., Working Group 36-05, Cigré (Disturbing Loads); "Harmonics, Characteristics Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", Electra, N° 77, Julho 1981.
- [5] XIA, D. and HEYDT, G. T. ; "Harmonic Power Flow Studies Part II - Implementation and Practical Application", IEEE -PAS, vol. PAS-101, N° 6, June 1982.
- [6] OLIVEIRA, J. C., OLIVEIRA, A. ; "Cargas Elétricas Especiais" - Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica.
- [7] OLIVEIRA, L. C. O, ROSSI, J. C., PIRES, F.A.C. ; "Análise da Histerese em Transformadores de Potência sob Magnetização Assimétrica Através de Medidas em Tempo Real" - SNPTEE 93.

- [8] LEMIEUX, G. ; "Power System Harmonic Resonance - A Documented Case", IEEE - Transactions on Industry Applications, vol. 26, N° 3, May/June 1990.

- [9] OLIVEIRA, L.C.O. , PASCHOARELI JR., D. e PIRES, F.A.C. ; "Instalações Multiconversoras: Geração e Fluxo Harmônico Considerando a Saída de Unidades Básicas para Manutenção", INDUSCON 92 (Conferência Internacional sobre Aplicação Industrial de Eletricidade), São Paulo, Julho 1992.

- [10] RIBEIRO, R. D. ; "Investigations of Harmonics in Transmission Systems", Phd Thesis, The Victoria University of Manchester, Julho 1975.

- [11] HINGORANI, N. G. and BURBERY, M. F. ; "Simulation of AC Systems Impedance in HVDC Systems Studies", IEEE-PAS, vol. PAS-89, N°5/6, May/June 1970.

- [12] SUBBA RAO, T. and REEVE ; "Harmonics Caused by Imbalanced Transformer Impedances and Imperfect 12-pulse Operation in HVDC Conversion", IEEE-PAS, vol. PAS-96, Feb. 1977.

- [13] PIRES, F. A. C. ; "Uma Contribuição ao Estudo de Harmônicas em Sistemas de Potência", Tese de Doutorado, UNICAMP, Fev/1991.

- [14] PASCHOARELI, D. J. ; "Avaliação de Distorções Harmônicas Utilizando-se Computadores de Pequeno Porte", Tese de Mestrado, UNICAMP, Dez/1991.

- [15] GARCIA, F. R. ; "Estudos de Fluxo Harmônico: Modelagens, Processo Iterativo e Análise de Sensibilidade", Tese de Mestrado, UFU, Maio/1992.

- [16] DE OLIVEIRA, J. C. e DE OLIVEIRA, A. ; "Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua", Curso de Extensão, UFU, 1985.
- [17] BOWLES, J. B. ; "AC System and Transformer Representation for HVDC Transmission Studies", IEEE-PAS, vol. PAS-89, N° 7, Sept/Oct. 1970.
- [18] CIGRÈ Working Group 36-05, "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", Electra, N° 77, July 1979.
- [19] VILELA, L. C. T. ; "Modelagem e Simulação de Fluxo Harmônico em Sistemas Elétricos", Tese de Mestrado, EFEI, 1981.
- [20] ABERDEEN UNIVERSITY/BRITISH PETROLEUM - Research Group; "The Advantages of Running Offshore Platform Electrical Power System at Higher Frequencies" - Aberdeen - Scotland, 1985.
- [21] GREENWOOD, A. ; "Electrical Transients in Power Systems" Wiley - Interscience, 1971.
- [22] STEEPER, D. E. and STRATFORD, R. P. ; "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters", IEEE-IA, vol. IA-12, N° 3, May/June 1976.
- [23] MONTICELLI, A.J. ; "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica".

APÊNDICE

TRABALHO PUBLICADO E APRESENTADO:
*CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE APLICAÇÃO INDUSTRIAL DE
ELETRICIDADE - INDUSCON 92 - São Paulo, Julho 1992.*

GRUPO VII

PLANEJAMENTO DE SISTEMA ELÉTRICOS (GPL)

A UTILIZAÇÃO DAS MATRIZES $[Z_{bus}(n)]$ PARA A ESCOLHA DA MELHOR LOCALIZAÇÃO DE CARGAS NÃO-LINEARES

Clider Adriane de Sousa Silva

Francisca A. de Camargo Pires

DSCE/FEE/UNICAMP

RESUMO

Este artigo propõe uma ferramenta computacional que através, apenas, da combinação adequada dos elementos das matrizes impedância de barra em função da ordem harmônica, $([Z_{bus}(n)])$, n = ordem harmônica, consegue estabelecer quais as barras que maiores distorções de tensão apresentarão quando da instalação de uma carga não-linear em uma determinada barra de um sistema elétrico de potência. Deste modo é possível encontrar a localização ótima de uma carga não-linear para se obter as menores distorções harmônicas de tensão; ou em se detectando as barras com as maiores distorções, se optar pela instalação conveniente de filtros.

1. INTRODUÇÃO

A presença de cargas não-lineares em um sistema elétrico de potência (SEP) acarreta, de um modo geral, distorções nas formas de onda de tensões e correntes deste sistema. Obviamente, tais distorções devem permanecer dentro de certos limites para o bom desempenho dos SEPs, sendo, as distorções de tensão objeto de maior preocupação por parte de concessionárias e consumidores.

Se as distorções presentes em um SEP forem periódicas, elas podem ser decompostas em suas componentes harmônicas. Deste modo, é possível estudar o sistema em questão utilizando-se o domínio da frequência (frequências harmônicas) ao invés de se utilizar o domínio do tempo.

Assim, as ferramentas computacionais existentes para a avaliação de distorções em SEPs, disponíveis comercialmente, utilizam o domínio da frequência, no qual o SEP passa a ser encarado como múltiplos sistemas: um sistema na frequência fundamental e os demais nas frequências harmônicas de interesse.

Sendo assim, poder-se-ia efetuar estudos de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente em instalações industriais, com o objetivo de tentar reduzir os níveis destas distorções provocadas pela operação de equipamentos geradores de componentes harmônicas.

Em sistemas elétricos, os níveis de distorção de tensão e/ou corrente presentes, decorrentes da operação de uma certa carga não-linear dependem notadamente da localização desta carga no sistema, sendo que o maior nível de distorção não ocorre necessariamente na barra onde a carga não-linear está instalada.

No caso específico de instalações industriais de grande porte a alteração da localização da carga não-linear na rede interna da instalação pode oferecer uma atenuação nos níveis de distorção harmônica. Para tanto é necessário

conhecer qual é o impacto que a carga não-linear apresentaria em cada uma das possíveis localizações na rede.

Para a avaliação das distorções, as ferramentas computacionais existentes além de exigirem o pleno conhecimento da parte linear do sistema, exigem o detalhamento da carga não linear e sua respectiva localização no sistema; e com estes dados, demandando normalmente um grande esforço computacional, é possível avaliar apenas as distorções oriundas daquela carga não-linear específica conectada em uma das barras do sistema.

Deste modo, a utilização das ferramentas computacionais tradicionais para a avaliação de distorções harmônicas no caso de instalações industriais demandaria tantos processamentos quantas fossem as possíveis localizações da carga não-linear.

Sendo assim, uma metodologia mais apropriada para se avaliar o impacto que uma carga não-linear causaria, em termos de distorções, para o sistema em questão, poderia ser baseada na análise de fatores tabelados que pudessem traduzir as possíveis distorções presentes em todo o sistema sabendo-se apenas a localização e o porte da carga não-linear a ser instalada. Esta tabela poderia ser obtida conhecendo-se apenas a configuração da parte linear do sistema e através de um único processamento computacional.

Obviamente esta nova ferramenta computacional não tem aplicação restrita às plantas industriais, podendo ser utilizada também a nível de planejamento em SEPs.

2. MÉTODO PROPOSTO

Um sistema de potência genérico, simétrico e equilibrado pode ser representado monofasicamente. Tendo-se as informações necessárias para se obter a matriz admitância de barra, $[Y_{bus}]$, tem-se, na frequência fundamental:

$$[Z_{bus}] = [Y_{bus}]^{-1} \quad (1)$$

Deste modo, as tensões e correntes nas barras do sistema se relacionam pela expressão:

$$V = [Z_{bus}] \cdot I \quad (2)$$

onde: I = vetor das injeções de corrente nas barras do sistema

V = vetor das tensões nas barras do sistema

O procedimento geral para a obtenção da matriz

$[Z_{bus}]$, desenvolvido originalmente para ser utilizado em fluxos de carga à frequência fundamental, pode ser utilizado para outras frequências harmônicas. Deste modo, para uma componente harmônica de ordem n a Expressão (2) torna-se:

$$V(n) = [Z_{bus}(n)] \cdot I(n) \quad (3)$$

Supondo-se que para um sistema com m barras, existam cargas não-lineares ligadas a este sistema. Então, com o objetivo de se avaliar as distorções de tensão presentes no sistema devido à presença de injeções harmônicas causadas por cargas não-lineares, ter-se-ia:

$$\begin{bmatrix} V_1(n) \\ \vdots \\ V_k(n) \\ \vdots \\ V_m(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(n) & \dots & Z_{1k}(n) & \dots & Z_{1m}(n) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1}(n) & \dots & Z_{kk}(n) & \dots & Z_{km}(n) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1}(n) & \dots & Z_{mk}(n) & \dots & Z_{mm}(n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(n) \\ \vdots \\ I_k(n) \\ \vdots \\ I_m(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Observa-se facilmente, que se for levada em conta a presença de injeção harmônica em apenas uma barra do sistema, necessita-se de informações de apenas uma coluna da matriz $[Z_{bus}(n)]$ para a obtenção das distorções de tensão em cada barra do sistema, uma vez que para as demais barras, as injeções harmônicas são nulas. Desta forma, supondo-se, genericamente, que a carga não-linear encontra-se na barra k , ter-se-ia:

$$\begin{bmatrix} V_1(n) \\ \vdots \\ V_k(n) \\ \vdots \\ V_m(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1k}(n) \\ \vdots \\ Z_{kk}(n) \\ \vdots \\ Z_{mk}(n) \end{bmatrix} \cdot I_k(n) \quad (5)$$

O processo deve ser repetido para todas as barras, tantas vezes quantas forem as ordens harmônicas a serem consideradas, e deste modo avalia-se a distorção total existente no sistema.

Tomando-se como fontes geradoras de harmônicas, os conversores estáticos, uma vez que são estas cargas não-lineares as que mais frequentemente aparecem em SEPs, e considerando-se uma operação sob condições ideais, pode-se estabelecer uma uniformidade nas injeções harmônicas de corrente, assumindo-se que cada componente de injeção harmônica pode ser expressa como uma fração da componente fundamental de injeção de corrente. Assim, tem-se:

$$I(n) = \frac{I(1)}{n} \quad (6)$$

Pode-se observar que o fato de se considerar o módulo de cada componente harmônica como sendo dado pela Expressão (6) não prejudica os resultados obtidos, uma vez que causaria, na pior das hipóteses, apenas uma superestimativa dos níveis de distorções harmônicas, levando-se em conta que na realidade, um conversor estático em operação real apresenta um nível de injeção harmônica de corrente menor do que no caso ideal, como mostra a Tabela 1 a seguir.

TABELA 1 - Correntes harmônicas presentes na entrada de conversores estáticos de potência (6 pulsos) em p.u. da fundamental.

	Ordem Harmônica							
	5	7	11	13	17	19	23	25
Val.								
teór.	0,200	0,143	0,090	0,077	0,059	0,053	0,043	0,040
Val.								
prát.	0,175	0,110	0,045	0,029	0,015	0,010	0,009	0,008

Partindo-se do princípio que o objetivo do método desenvolvido é determinar qual (ou quais) a(s) barra(s) mais sensível(is) perante uma perturbação harmônica presente em qualquer barra do sistema, sendo portanto uma análise mais qualitativa do que quantitativa, justifica-se o fato de se considerar as respectivas injeções harmônicas de corrente de uma forma padronizada (normalizada). Assim tem-se para a corrente fundamental:

$$I_k(1) = 1,0 \text{ p.u.} \quad (7)$$

e para cada componente de injeção harmônica:

$$I_k(n) = \frac{1,0}{n} \text{ p.u.} \quad (8)$$

onde $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$

Através de uma adequada combinação das Expressões (5) e (8), pode-se fazer uma avaliação das distorções de tensão presentes no sistema.

Analogamente, pode-se adotar um valor normalizado para a componente fundamental de tensão de cada uma das barras do sistema a ser analisado, justificando-se esta medida pelo fato de que em situações reais as barras de um SEP apresentam estados muito próximos a 1,0 p.u., ou seja:

$$V_k(1) = 1,0 \text{ p.u.} \quad (9)$$

O Fator de Distorção Harmônica Total de Tensão (FDT), numa barra k , é definido por:

$$FDT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_k(n))^2}}{V_k(1)} \quad (10)$$

e deste modo, de acordo com as Expressões (8) e (9) pode-se definir uma nova expressão para o Fator de Distorção Harmônica Total de Tensão; fator este que expressa a distorção total de tensão da barra i quando se tem um conversor ideal de 6 pulsos conectado à barra j com uma corrente fundamental igual a 1,0 p.u.:

$$F_{i,j}(\%) = \sqrt{\sum_n \left(\frac{Z_{ij}(n)}{n} \right)^2} \cdot 100 \quad (11)$$

onde $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$

Tais fatores podem ser avaliados a partir das matrizes $[Z_{bus}(n)]$ expressas em p.u., podendo ser agrupados de forma matricial, de modo a revelar as prováveis distorções presentes no sistema. Os elementos desta nova matriz indicarão a porcentagem da distorção harmônica total de tensão causada na barra i , tendo-se um conversor na barra j , e proporcionalmente ao porte do conversor, uma vez que a matriz está normalizada para 1,0 p.u. de corrente fundamental, podendo ser designados por Fatores Relativos de Distorção Harmônica Total de Tensão.

Deste modo, se para um sistema, $F_{3,4} = 5\%$, tem-se que a distorção harmônica total de tensão da barra 3 devido à instalação de um conversor ideal de 6 pulsos na barra 4, com uma corrente fundamental de 0,35 p.u., será de apenas 1,75%.

3. CASO SIMULADO

Como exemplo de aplicação do método, utilizou-se um sistema já estudado, presente na referência [1], contendo 8 barras e um conversor de 6 pulsos como fonte de injeções harmônicas.

A seguir tem-se o diagrama unifilar desse sistema representado na Figura 1, bem como os dados das linhas desse sistema de maneira tradicional como são utilizados em fluxos de carga à frequência industrial nas concessionárias de energia elétrica.

[3] MONTICELLI A. J.; "Fluxo de carga em Redes de Energia Elétrica", Edgard Blücher, 1983.