

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**FLUXO DE POTÊNCIA EM REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO NA PRESENÇA DE HARMÔNICAS CAUSADAS POR
CARGAS NÃO-LINEARES**

‘ Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica ’

Marcelo Alves Felzky

Prof. Roberto Salgado
Orientador

Florianópolis, junho de 1998

**FLUXO DE POTÊNCIA EM REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO NA PRESENÇA DE HARMÔNICAS CAUSADAS POR
CARGAS NÃO-LINEARES**

Marcelo Alves Felzky

‘Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistemas de Potência
e aprovada em sua forma final pelo curso de Pós-Graduação’

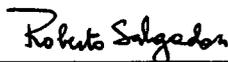


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Orientador



Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Coordenador do Curso

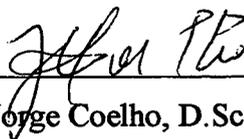
Banca Examinadora



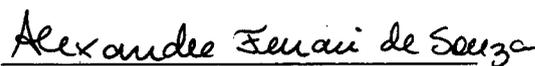
Prof. Roberto Salgado, Ph.D.
Orientador



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.
Co-Orientador



Prof. Jorge Coelho, D.Sc.



Prof. Alexandre Ferrari de Souza, Dr.Eng.

*Dedicada a todos meus familiares, em especial aos meus pais,
que sempre acompanharam de perto todas as conquistas,
não me deixando esmorecer diante das dificuldades ou derrotas,
que a vida reserva.*

AGRADECIMENTOS

Os mais sinceros votos de estima e agradecimento aos meus orientadores Prof. Roberto Salgado e Prof. Hans Helmhut Zürn, que ao longo dos meus anos acadêmicos foram fontes de incentivo e informação para a minha vida profissional.

Agradeço aos professores do departamento de Engenharia Elétrica em especial aos de Sistema de Potência e Planejamento pela formação recebida.

Agradeço também ao professor Alexandre Ferrari do INEP, pelas valorosas informações que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

A todas as amigas cultivadas durante o curso de Pós-Graduação, especialmente a Luciano Vitoria Barboza, Ubirajara Franco Moreno e José Luiz de Azevedo que sempre estiveram presentes nos grupos de estudos durante a fase dos créditos.

Agradeço ao amigo Raimundo Teive pelo incentivo e pela ajuda desprendida durante a realização deste trabalho.

Também a CAPS. pelo auxílio financeiro utilizado para suprirem as necessidades de material didático e livros utilizados durante a fase dos créditos e também para o desenvolvimento deste trabalho.

A meus pais que sempre incentivaram e proporcionaram minha total dedicação a este trabalho.

E a Daniele Pankush por ter sido, em todos os momentos, a companheira inseparável que preencheu as horas de solidão e tristeza com seu amor e otimismo reerguendo-me para o cumprimento desta etapa.

RESUMO

Neste trabalho propõe-se uma metodologia de solução para as equações do sistema de potência em regime permanente, na presença de sinais distorcidos de tensão e corrente, resultantes da presença de cargas não-lineares.

A abordagem utilizada para a solução considera sistemas monofásicos. A carga não-linear considerada é uma ponte retificadora, a qual é modelada aplicando-se a decomposição em série de Fourier.

Os conceitos básicos utilizados em análise harmônica são apresentados. Algumas das principais fontes geradoras de harmônicas são descritas, assim como o efeito causado nos equipamentos ligados ao sistema, devido à presença destas fontes. São apresentados ainda, os modelos matemáticos dos principais elementos da rede elétrica e das cargas lineares tradicionais utilizados na análise harmônica. A partir dos estudos realizados, é possível observar que as técnicas convencionais utilizadas tanto para a medição de energia elétrica como para a determinação do fator de potência são imprecisas na presença de formas de onda distorcidas.

Para o cálculo numérico das tensões harmônicas, foram implementados três programas em linguagem FORTRAN, baseados nos métodos de Newton e da Soma de Correntes para a solução das equações do fluxo de potência. Sistemas-teste de diferentes portes foram utilizados para avaliar o desempenho dos métodos considerados.

ABSTRACT

In this work, a methodology is proposed to the solution of the nonlinear power system equations in steady state, considering harmonics resulting from nonlinear loads.

The proposed approach considers single phase networks. The nonlinear load considered is a rectifier, which is modelled via decomposition in Fourier series.

The basic concepts about harmonic analysis are presented, some of the main sources of harmonic waves and the effect of these waves over the equipments of the power system are described. The analytical models of the principal elements of the power network used in the harmonic analysis are also presented. Based on the study about harmonic power flow methodologies, it is observed that the conventional techniques for both electric energy measurement and power factor determination are not suitable, if nonsinusoidal waveforms are present.

Three computer programs, based on distinct numerical methods for the solution of nonlinear equations of the power system were implemented in Fortran. Test systems of different sizes were used to assess the methodologies considered.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	<i>iv</i>
RESUMO	<i>v</i>
ABSTRACT	<i>vi</i>
SUMÁRIO	<i>vii</i>
1. INTRODUÇÃO	1
2. ONDAS HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	4
2.1. Conceitos Básicos	4
2.1.1. Funções Periódicas e Série de Fourier	6
2.1.2. Definições Básicas	8
2.1.2.1. Valores Eficazes de Tensão e Corrente	9
2.1.2.2. Cálculo das Potências Ativas e Reativas e do Fator de Potência	9
2.1.2.3. Taxa de Distorção Harmônica	12
2.2. Geração de Harmônicas e Cargas Não-Lineares	13
2.2.1. Conversores	14
2.2.2. Fornos a Arco	15
2.2.3. Compensadores Estáticos de Reativos Controlados por Tiristores	19
2.2.4. Elos de Corrente Contínua (CC)	21
2.2.4.1. Funcionamento do Elo CC	22

2.2.5. Transformadores e Reatores de Núcleos Saturados	23
2.2.5.1. Transformador a Vazio	24
2.2.5.2. Não Linearidade na Magnetização do Transformador	24
2.2.5.3. Corrente de “Inrush”	26
2.2.6. Lâmpadas Fluorescentes Compactas	27
2.3. Efeitos de Ondas Harmônicas com Conteúdo Harmônico	27
2.3.1. Sistemas de Transmissão	28
2.3.2. Efeitos nos Motores Elétricos e Geradores	28
2.3.3. Transformadores	32
2.3.4. Dispositivos de Proteção	32
2.3.5. Medidores Analógicos	33
2.3.6. Ocorrência de Ressonância	34
2.3.6.1. Ressonância Série	35
2.3.6.2. Ressonância Paralela	35
2.3.7. Sistemas de Comunicação	36
2.4. Retificador Monofásico de Onda Completa em Ponte Alimentando uma Carga RL	37
2.4.1. Funcionamento do Circuito	37
2.4.2. Generalizações	39
2.4.3. Determinação de K em Regime Permanente	40
2.4.4. Determinação da Corrente na Linha	42
2.5. Conclusões	46

3. ESTUDO DO FLUXO DE POTÊNCIA CONSIDERANDO

CARGAS NÃO-LINEARES	48
3.1. Dinâmica das Harmônicas na Rede Elétrica	48
3.2. Modelagem dos Componentes no Domínio da Frequência	54
3.2.1. Linha de Transmissão	55
3.2.2. O Modelo do Transformador	56
3.2.3. O Gerador	64

3.2.2. O Modelo do Transformador	56
3.2.3. O Gerador	64
3.2.4. Cargas Lineares Passivas	69
3.2.5. Outros Elementos	74
3.3. Modificações no Método de Newton-Raphson para Considerar o Efeito harmônico das Cargas Não-Lineares	74
3.3.1. Método de Newton Modificado: Medidas Corretas das Injeções de Potência são Disponíveis nas Barras PQNL	76
3.3.2. Método de Newton Modificado: Falta de Medidas Corretas das Potências Ativas e Reativas nas Barras PQNL	83
3.4. Fluxo de Carga Harmônica Através do Método das Somas de Correntes	84
3.4.1. O Método da Soma das Injeções de Corrente	85
3.4.2. Aplicação do Método da Soma das Injeções de Corrente no Fluxo de Carga Harmônico	87
3.4.2.1. Método das Somas das Injeções de Correntes para a Determinação das tensões na Frequência Fundamental	87
3.4.2.2. Processo Iterativo Harmônico para a Solução das Tensões Harmônicas	91
3.5. Conclusões	93
4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	95
4.1. Sistema-exemplo de 2 Barras	96
4.2. Sistema-exemplo de 4 Barras	100
4.3. Sistema de 14 Barras	103
4.4. Sistema de 22 Barras	106
4.5. Sistema de 32 Barras	110
4.6. Conclusões	114
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	116

APÊNDICE A

RETIFICADOR MONOFÁSICO COM CARGA R-L	119
A.1. Exemplo Numérico	119
A.2. Peculiaridades da Carga R-L	126
A.2.1. Variação de L	127
A.2.2. Variação R	131
A.3. Conclusões Gerais	132

APÊNDICE B

DERIVADAS PARCIAIS DAS EQUAÇÕES DE BALANÇO DE POTÊNCIA E AS DE BALANÇO DE CORRENTE COM RELAÇÃO AOS MÓDULOS DAS TENSÕES E SEUS ÂNGULOS	133
B.1. Matriz Jacobiana das Equações de Balanço de Potência na Freqüência Fundamental	133
B.2. Matriz Jacobiana das Equações de balanço de Potência nas Freqüências Harmônicas	135
B.3. Matriz Jacobiana das Correntes Harmônicas das Cargas Não-Lineares com Respeito a suas Tensões terminais de Freqüência Fundamental	136
B.4. Matriz Jacobiana das Equações de Balanço de Correntes Harmônicas com Respeito a suas Tensões de Freqüências harmônica	139

APÊNDICE C

ROTINAS UTILIZADAS NO MÉTODO DAS SOMA DE CORRENTES	144
C.1. Vetor e Rotina de Adjacências	144
C.2. Vetor e Rotina de Nível	145
C.3. Vetor e Rotina do BUSUP	146
C.4. Rotina que Calcula as Correntes Acumuladas em Cada Nó	147
C.5. Rotina das Correções das Tensões	148

APÊNDICE D

FORMATO DE ENTRADA DE DADOS

150

APÊNDICE E

ARQUIVOS DE ENTRADA DE DADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS

E SEUS RESPECTIVOS ARQUIVOS DE RESULTADOS

GERADOS PELOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

153

E.1. Sistema com 14 Barras Usado no Fluxo Harmônico

153

E.2. Sistema com 22 Barras Usado no Fluxo Harmônico

157

E.3. Sistema com 32 Barras para Simulação Harmônica

163

BIBLIOGRAFIA

170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Amplitude das Harmônicas Produzidas por Fornos a Arco	16
Tabela 2	Seções de Condutores de Cobre	61
Tabela 3	Matriz Jacobiana para o Sistema de Duas Barras	97
Tabela 4	Condições Iniciais Pré-cálculadas para o Método de Newton	98
Tabela 5	Convergência dos Métodos Propostos, com Condições Iniciais Pré-cálculadas	99
Tabela 6	Número de Iterações do Método de Newton, para o Segundo Tipo de Inicialização	99
Tabela 7	Potências Cálculadas na Barra 2	100
Tabela 8	Resultado das Simulações do Sistema de Quatro Barras Pelos Três Métodos	102
Tabela 9	Resultados da Simulação no sistema de 14 barras via Método Convencional de Newton-Raphson	104

Tabela 10	Resultados do Fluxo de Carga Harmônico para o Sistema com 14 Barras via Soma das Injeções de Correntes	104
Tabela 11	Perdas de Potência Ativa na Transmissão	104
Tabela 12	Taxas de Distorções harmônicas da Tensão e Corrente	105
Tabela 13	Parâmetros das cargas não Lineares	105
Tabela 14	Resultados da Simulação no sistema de 22 Barras via Método Convencional de Newton-Raphson	107
Tabela 15	Resultados do Fluxo de Carga Harmônico para o Sistema com 22 Barras via Soma das Injeções de Correntes	108
Tabela 16	Perdas de Potência Ativa na Transmissão	108
Tabela 17	Taxas de Distorções harmônicas da Tensão e Corrente	108
Tabela 18	Parâmetros das cargas não Lineares	108
Tabela 19	Resultados da Simulação no sistema de 22 Barras via Método Convencional de Newton-Raphson	111
Tabela 20	Resultados do Fluxo de Carga Harmônico para o Sistema com 22 Barras via Soma das Injeções de Correntes	112
Tabela 21	Perdas de Potência Ativa na Transmissão	112

Tabela 22	Taxas de Distorções harmônicas da Tensão e Corrente	112
Tabela 23	Parâmetros das cargas não Lineares	113
Tabela A.1	Variação da Impedância da Carga com a Frequência	120
Tabela A.2	Variação das Potências e Corrente com a Variação da Indutância da Carga	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Formas de ondas de funções trigonométricas	8
Figura 2	Tetraedro de Potência	11
Figura 3	Diagrama unifilar do Forno a Arco	16
Figura 4	Tensão e corrente como função do comprimento de arco	18
Figura 5	Diagrama de Blocos do Forno a Arco	18
Figura 6	Circuito de um RTC (reator controlado por tiristores)	19
Figura 7	Forma de onda da tensão e corrente em um RTC	21
Figura 8	Diagrama unifilar de um elo de corrente continua	22
Figura 9	Curva de magnetização de um transformador	25
Figura 10	Efeito da Histerese na corrente magnetizante	25
Figura 11	Torque e corrente harmônica no Rotor	31

Figura 12	Variação da impedância equivalente medida em um ponto do sistema com a frequência	34
Figura 13	Circuito e forma de onda de um circuito RLC série	35
Figura 14	Circuito e forma de onda de um circuito RLC Paralelo	36
Figura 15	Circuito de uma ponte retificadora alimentando um carga RL	37
Figura 16	Símbolo de um diodo semicondutor ideal	38
Figura 17	Forma de onda da tensão na carga	38
Figura 18	Evolução transitória da corrente na carga do retificador	39
Figura 19	Forma de onda da corrente alternada drenada da rede elétrica pelo retificador da figura 15	42
Figura 20	Sistema com n barras na frequência fundamental	49
Figura 21	Sistema com n Barras na frequência harmônica	50
Figura 22	Injeção de corrente em uma barra de carga linear	50
Figura 23	Balanço de corrente em uma barra de carga não-linear	52
Figura 24	Seção de um condutor cilíndrico	57
Figura 25	Razão R / R_{dc} com a frequência	60

Figura 26	Fator multiplicativo da indutância interna	61
Figura 27	Condutância e susceptância v.s. ordem harmônica para RL igual a unidade	63
Figura 28	Condutância e susceptância v.s. ordem harmônica para condutor MCM 16.51 obtido da Tabela 2	64
Figura 29	Modelo do transformador na frequência	65
Figura 30	Modelo da primeira ressonância de um transformador	65
Figura 31	Modelo CIGRÉ de Um transformador	65
Figura 32	Modelo Pi do transformador	66
Figura 33	Modelos sugeridos por [3] Arrillaga para transformadores	67
Figura 34	Modelo do Gerador	69
Figura 35	Modelos de cargas lineares	70
Figura 36	Circuito monofásico equivalente de um motor trifásico	72
Figura 37	Impedância proposta por Berg	74
Figura 38	Fluxograma do programa harmônico via Newton-Raphson	81
Figura 39	Diagrama de um sistema radial	85

Figura 40	Sistema radial alimentando uma carga não-linear	88
Figura 41	Fluxograma do método das somas de Correntes	90
Figura 42	Sistema de distribuição modelado na frequência	91
Figura 43	Fluxograma para a determinação das tensões nas frequências harmônicas	92
Figura 44	Sistema exemplo de duas barras	96
Figura 45	Sistema com quatro barras	101
Figura 46	Sistema com quatorze barras	103
Figura 47	Sistema com vinte e duas barras	107
Figura 48	Sistema com trinta e duas barras	110
Figura A.1-1	Circuito do retificador monofásico	119
Figura A.1-2	Forma de onda de tensão na carga	120
Figura A.1-3	Forma de onda de corrente na carga	122
Figura A.1-4	Forma de onda da corrente na linha	123
Figura A.1-5	Formas de corrente na carga pela variação da indutância	128
Figura A.1-6	Forma de onda de corrente na linha	129

Figura A.1-7	Outras formas de corrente na carga devido a variação da indutância	129
Figura A.1-8	Variação do fator de potência fundamental em função da indutância da carga	130
Figura A.1-9	Variações dos fatores de potência em função da indutância	130
Figura A.1-10	Variações das potências aparente e ativa em função da variação da indutância da carga	130
Figura A.1-11	Variação das potências reativas total e a de defasagem como função da indutância da carga	130
Figura A.1-12	Variações das potências reativas total e de distorção em função da indutância da carga	131
Figura A.1-13	Variação da corrente eficaz na carga em função da indutância	131

1. INTRODUÇÃO

Desde a sua proposição, os estudos de fluxo de potência têm sido utilizados pelas companhias de energia elétrica tanto no planejamento como na operação dos sistemas de energia elétrica.

No nível de distribuição, as concessionárias utilizam os programas computacionais de fluxos de potência, para verificar se o atendimento aos consumidores está sendo feito dentro de níveis aceitáveis, de forma a manter a confiabilidade neste fornecimento, além de um padrão satisfatório de qualidade de serviço.

Durante os últimos anos, o crescimento em número e sofisticação dos equipamentos eletrônicos, tais como retificadores (usados em fontes chaveadas, elos de corrente contínua, veículos elétricos, etc.), fornos a arco, lâmpadas de descargas (lâmpadas fluorescentes compactas), impôs a necessidade de uma reformulação na abordagem convencional de solução das equações da rede elétrica (baseados em tensões e correntes senoidais puras e de mesma frequência das unidades geradoras). Este novo tipo de carga, acentuadamente não-linear, provoca o aparecimento de correntes harmônicas múltiplas da frequência fundamental. Estas correntes por sua vez, penetram na rede elétrica distorcendo a forma de onda da tensão das barras do sistema. Isto resulta no aquecimento dos condutores de energia e equipamentos de controle e medição ligados a ele, além de possíveis pontos de ressonância no sistema e medidas incorretas do fator de potência das cargas e tensões nas barras.

Ao longo dos últimos anos, estudos têm sido feitos no sentido de determinar numericamente com precisão um ponto de operação para os sistemas de potência na presença de formas de ondas distorcidas de tensão e corrente. Uma das primeiras abordagens que trata da reformulação do método de Fluxo de Potência Newton-Raphson levando em conta a modelagem das cargas não lineares é apresentada na referência [36]. A carga considerada nesta abordagem foi uma ponte retificadora trifásica controlada por tiristores. Na referência [3], apresenta-se uma resenha dos diversos aspectos relacionados a este assunto (fontes harmônicas, suas causas e efeitos, modelagem e estudos computacionais de penetração harmônica). A referência [11] descreve os modelos genéricos para reatores de núcleo

saturado, reatores controlados por tiristores e conversores estáticos trifásicos, e propõe um método iterativo no domínio da frequência através da simulação trifásica.

Baseado nos enfoques observados na literatura, propõe-se no presente trabalho o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a determinação de um ponto de operação da rede elétrica em regime permanente considerando as eventuais não linearidades da carga.

O estudo realizado, denominado na literatura de “Fluxo de Potência Harmônico”, consiste fundamentalmente na determinação da solução das equações da rede efetuando-se uma decomposição das correntes e tensões envolvidas nestas equações em série de Fourier. Posteriormente, essas equações são resolvidas iterativamente de maneira que os resíduos de potência e de injeções de correntes harmônicas satisfaçam a uma tolerância, pré-estabelecida. Obtém-se desta forma o ponto de operação em regime permanente para a carga considerada, incluindo-se as excitações dos geradores e os despachos de potência das máquinas.

Uma vez resolvidas as equações da rede, é possível então determinar com maior precisão a distribuição da geração de potência, os níveis de distorção em todas as tensões do sistema, as perdas ocasionadas pela penetração harmônica, o fator de potência da carga, e ainda identificar as harmônicas de maiores amplitudes. Estas geralmente causam distorções inaceitáveis segundo as normas técnicas. Entretanto, o conhecimento preciso do seu efeito facilita o projeto e a localização dos filtros que evitam a sua propagação na rede.

Portanto, visou-se neste trabalho o desenvolvimento teórico de uma metodologia com a sua correspondente implementação computacional, para a obtenção do espectro de frequências das tensões em todas as barras do sistema e das correntes nas linhas de transmissão. Determina-se adicionalmente o despacho da geração na presença das eventuais cargas não-lineares do sistema de potência.

O estudo realizado está apresentado nesta dissertação da seguinte forma:

- No capítulo 2, uma análise das ondas harmônicas no sistema de potência é apresentada. As principais fontes geradoras de harmônicos e o seu efeito nos equipamentos ligados à rede são descritos. Com o objetivo de facilitar a interpretação física do fenômeno da propagação das correntes harmônicas pelo sistema de potência, uma revisão nos conceitos de básicos de potência, corrente e tensão é realizada. Conclui-se este capítulo com a representação analítica de uma carga não-linear conveniente para a sua incorporação no problema de fluxo de potência.
- No capítulo 3 é apresentada a formulação do estudo do fluxo de potência considerando as cargas não-lineares. A representação dos componentes do sistema de potência juntamente com a representação das cargas lineares convencionais no domínio da frequência é apresentada. Finaliza-se este capítulo descrevendo-se as modificações necessárias nos métodos de Newton e da Soma das Injeções de Correntes para que a não-linearidade das cargas seja considerada.
- O capítulo 4 apresenta os resultados dos testes realizados com sistemas de diferentes portes. São analisadas as simulações feitas nos casos-teste com os programas implementados em FORTRAN.
- O capítulo 5 sumariza as principais conclusões deste trabalho, e apresenta algumas sugestões para futuros estudos.

2. Ondas Harmônicas em Sistemas Elétricos

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico produziu certos equipamentos automatizados, os quais, devido às suas características de funcionamento, podem degradar a forma de onda da corrente e tensão na rede elétrica. Apesar de distorcida, a forma de onda periódica pode ser estudada examinando-se seus componentes harmônicos. Para a compreensão deste estudo definições básicas são apresentadas neste capítulo.

O termo harmônico, originário da Acústica, é utilizado para descrever a vibração de uma corda ou coluna de ar em uma frequência que é múltipla da fundamental. Por analogia, em sistemas elétricos a componente harmônica é definida como o conteúdo do sinal que apresenta uma frequência múltipla inteira da frequência nominal do sistema de energia elétrica.

Nos últimos anos, vários problemas têm sido causados por correntes harmônicas [1, 2, 3]. Nestas ocorrências destacam-se principalmente o aumento das perdas nos ramais de alimentação das cargas, o aquecimento em equipamentos com redução do seu rendimento e da sua vida útil, a eventual destruição de equipamentos ligados ao sistema (capacitores para correção do fator de potência, por exemplo) etc. Em geral estes problemas são resultantes da circulação de sobrecorrentes causadas por ressonância. As harmônicas podem ainda interferir no desempenho dos equipamentos de proteção. Em virtude disto, as metodologias de estudo de harmônicas têm se tornado uma ferramenta de extrema necessidade tanto na análise como no projeto dos sistemas de energia, dentro do aspecto denominado “**Qualidade de Energia**”.

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos relacionados à corrente e à tensão harmônicas, e a forma de avaliação das potências relacionadas a essas grandezas. Em seguida são descritas algumas das cargas não-lineares mais comuns, os efeitos de correntes harmônicas circulando na rede e nos equipamentos ligados à mesma, e a modelagem completa de uma carga não-linear.

2.1 Conceitos Básicos

Com o objetivo de facilitar a leitura das seções subseqüentes, esta seção sumariza os

principais termos e definições encontrados na literatura especializada. Estes são listados a seguir.

Harmônica: componente de uma onda periódica distorcida, cuja frequência é um múltiplo da frequência fundamental ;

Harmônicas características: harmônicas produzidas pelos equipamentos conversores, que utilizam semicondutores (ponte retificadora) na sua operação normal sob condição equilibrada. Elas são obtidas por

$$h = k \times q \pm 1 \quad (2.1)$$

onde, h é a harmônica característica, k é um inteiro, e q é o número de pulsos da estrutura conversora.

Número de pulsos: número de sucessivas comutações não simultâneas que ocorrem no circuito conversor durante cada ciclo da rede.

Harmônicas não características: são harmônicas diferentes daquelas determinadas pela equação (2.1), as quais surgem na corrente dos retificadores devido à existência de impedâncias diferentes em cada uma das fases do sistema trifásico, pelo desequilíbrio nas tensões aplicadas à estrutura retificadora trifásica e por tempos de disparos não sincronizados (assimétricos) dos tiristores.

Carga não-linear: é a carga que apresenta uma forma de onda de corrente não-senoidal quando alimentada por uma tensão cuja forma de onda é puramente senoidal .

Fator de distorção: é a razão entre a raiz quadrada do somatório dos quadrados dos conteúdos harmônicos pelo valor da fundamental. Frequentemente expresso como percentual da fundamental, ele fornece uma medida de quão longe um sinal está da sua forma senoidal pura e é utilizado tanto para a corrente como para a tensão.

Filtros sintonizados: são filtros consistindo numa combinação de capacitores, reatores e resistências, selecionados com o objetivo de se obter uma impedância mínima (ou máxima) em uma dada frequência .

2.1.1. Função Periódica e Série de Fourier

Algumas funções periódicas definidas por mais de uma sentença (expressão) podem ser estudadas através de uma série de funções trigonométricas, cujas amplitude e fase de suas componentes estão ligadas com a forma da onda distorcida em questão.

Formas de ondas quadradas ou mesmo uma soma de exponenciais com senos e cossenos podem aparecer em alguns casos nos sistemas de energia elétrica. Neste caso a decomposição dessas funções em série de Fourier se torna necessária para um estudo do fluxo de potência no sistema. A expansão em série de Fourier fornece a fase e a amplitude das componentes fundamentais e harmônicas de um sinal periódico e distorcido. A seguir é feita uma revisão teórica da expansão em série de Fourier.

A função periódica $f(x)$ de período T pode ser decomposta numa série trigonométrica de senos e cossenos somada a uma constante (denominada valor médio ou componente contínua da onda), da seguinte forma:

$$f(x) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cdot \cos(m \cdot x) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \cdot \sin(m \cdot x) \quad (2.2)$$

Os coeficientes dos termos desta série são obtidos resolvendo as seguintes integrais [4]:

$$a_0 = \left(\frac{1}{T}\right) \cdot \int_0^T f(x) dx \quad (2.3)$$

$$a_m = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T f(x) \cdot \cos(m \cdot x) \cdot dx \quad (2.4)$$

$$b_m = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T f(x) \cdot \sin(m \cdot x) \cdot dx \quad (2.5)$$

Uma vez determinados todos os coeficientes da série de Fourier, é possível compor os senos e cossenos (forma retangular da série de Fourier) de mesma frequência em um seno, ou cosseno (forma polar da série de Fourier) da seguinte maneira:

$$\sum [a_n \cdot \cos(n \cdot x) + b_n \cdot \sin(n \cdot x)] = \sum \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \sin(n \cdot x + \phi) = \sum \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot \cos(n \cdot x - \phi) \quad (2.6)$$

onde,

$$\phi = \arctg(a_n / b_n) \dots e \dots \phi = \arctg(b_n / a_n) \quad (2.7)$$

Precauções devem ser tomadas nesta composição. Se o sinal de (b_n) for negativo multiplica-se o módulo da composição em seno por -1 , e a composição em cosseno não se altera. Por outro lado, se o coeficiente (a_n) for negativo apenas a composição em cosseno é alterada, multiplicando-se o seu módulo por -1 .

Outra forma de efetuar esta composição consiste em usar a fórmula fasorial da seguinte maneira:

- Para achar a composição em seno: $y_n s = b_n + j \cdot a_n$ (2.8)

Convertendo a expressão (2.8) para a forma polar, e retirando da mesma o módulo e o argumento.

- No caso do cosseno: $y_n c = a_n + j \cdot b_n$ (2.9)

Convertendo a expressão (2.9) para a forma polar, e retirando da mesma o módulo e o argumento com sinal negativo.

Assim, evita-se o problema do sinal relacionado à composição obtida através do primeiro método.

A seguir é apresentado um exemplo de quatro casos, onde se deseja achar a composição seno e cosseno equivalente usando as equações mostradas anteriormente nesta seção.

Forma inicial $Y=b.\text{sen}(x)+a.\text{cos}(x)$	Composição seno $Y1$	Composição coseno $Y2$	Complexa seno $Ys = b + j a$	Complexa coseno $Yc = a + j b$
$2.\text{sen}(x) + 3.\text{cos}(x)$	$3,6 \times \text{sen}(x + 0,9827)$	$3,6 \times \text{cos}(x - 0,588)$	$3,6 \angle 0,9827$	$3,6 \angle 0,588$
$-2.\text{sen}(x) + 3.\text{cos}(x)$	$3,6 \times \text{sen}(x + 2,158)$	$3,6 \times \text{cos}(x + 0,588)$	$3,6 \angle 2,158$	$3,6 \angle -0,588$
$2.\text{sen}(x) - 3.\text{cos}(x)$	$3,6 \times \text{sen}(x - 0,9827)$	$3,6 \times \text{cos}(x - 2,553)$	$3,6 \angle -0,9827$	$3,6 \angle 2,553$
$-2.\text{sen}(x) - 3.\text{cos}(x)$	$3,6 \times \text{sen}(x - 2,158)$	$3,6 \times \text{cos}(x + 2,553)$	$3,6 \angle -2,158$	$3,6 \angle -2,553$

Em cada um dos casos pode-se verificar as igualdades plotando-se Y , $Y1$ e $Y2$, conforme ilustram as figuras 1(a), 1(b), 1(c) e 1(d), respectivamente.

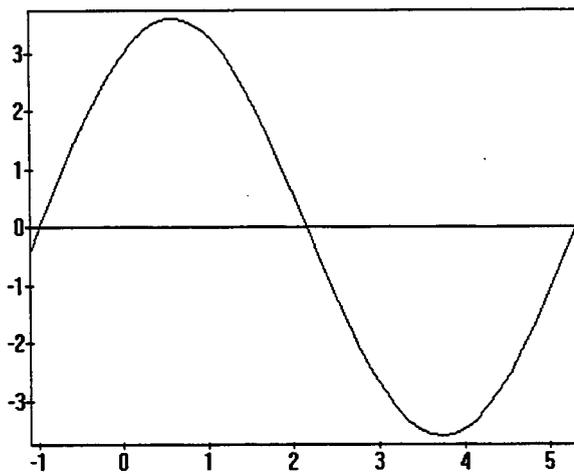


Figura 1(a), $y = 2\sin(x) + 3\cos(x)$

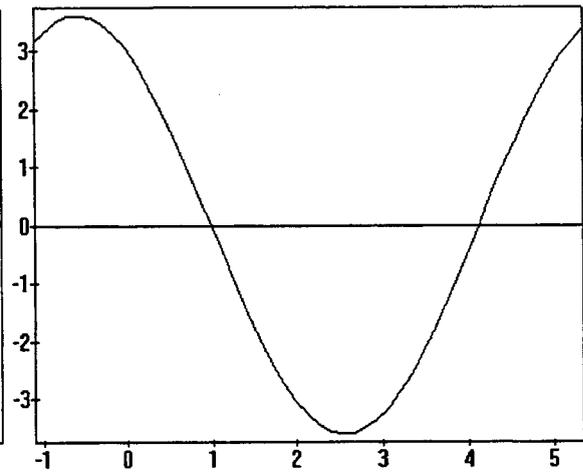


Figura 1(b), $y = -2\sin(x) + 3\cos(x)$

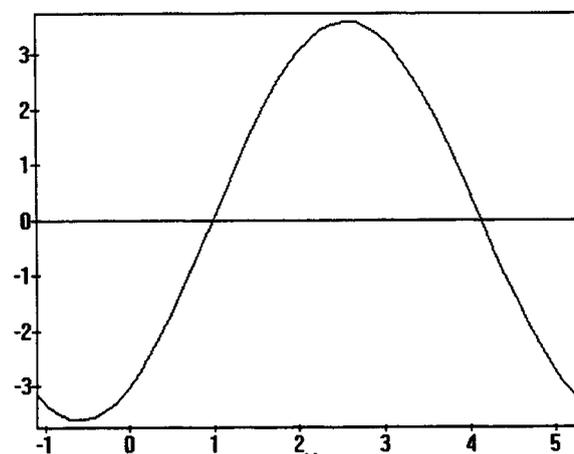


Figura 1(c), $y = 2\sin(x) - 3\cos(x)$

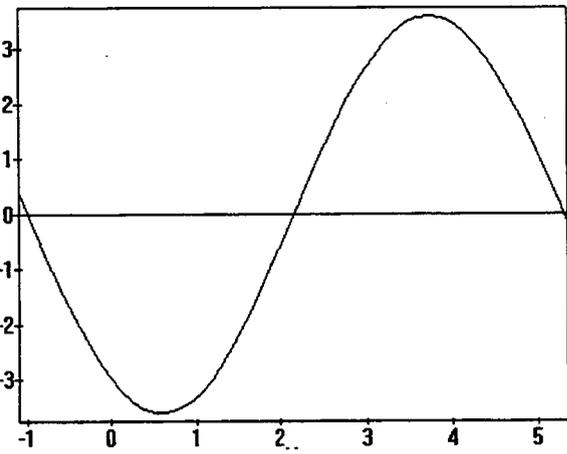


Figura 1(d), $y = -2\sin(x) - 3\cos(x)$

2.1.2. Definições Básicas

As definições a seguir, encontradas nas referências [4], [5] e [6], são empregadas na análise de circuitos que apresentam, além da componente fundamental, componentes harmônicas na tensão e na corrente .

2.1.2.1. Valores eficazes de tensão e corrente

Uma onda de corrente $i(x)$ periódica e não-senoidal, passando por um resistor R , produz uma potência P (potência média) determinada pelo valor eficaz ou *rms* (valor médio quadrático) da onda. Esta mesma potência P poderia ser produzida em R através de uma corrente constante I . Diz-se então, que a corrente $i(x)$ tem um valor efetivo ou eficaz, equivalente à corrente constante I . O mesmo conceito se aplica à tensão.

Supondo uma tensão periódica aplicada a um circuito linear, a corrente resultante terá o mesmo conteúdo harmônico da tensão, porém com diferentes amplitudes e fases desses harmônicos, já que a impedância varia com $n.\omega$. Assim, pode-se escrever:

$$v = V_o + \sum V_n \cdot \sin(n.\omega.t + \theta_n) \quad (2.10)$$

$$i = I_o + \sum I_n \cdot \sin(n.\omega.t + \psi_n) \quad (2.11)$$

onde V_n .e. I_n são valores de pico, com os correspondentes valores eficazes:

$$V_{rms} = \sqrt{V_o^2 + \sum \frac{1}{2} \cdot V_n^2} \quad (2.12)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_o^2 + \sum \frac{1}{2} \cdot I_n^2} \quad (2.13)$$

2.1.2.2. Cálculo das Potências Ativa e Reativa e do Fator de Potência

A potência ativa P resulta da integração da potência instantânea obtida pelo produto da tensão v pela corrente i , isto é,

$$P = V_o \cdot I_o + \sum \frac{1}{2} \cdot V_n \cdot I_n \cdot \cos(\phi_n) \quad (2.15)$$

Na expressão (2.15), verifica-se que corrente e tensão de frequências diferentes não contribuem para a potência média (útil ou ativa), uma vez que estes termos são ortogonais entre si, e a sua integração no período resulta um valor nulo.

O módulo da potência aparente é determinado por:

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (2.16)$$

de onde se obtém :

$$S^2 \equiv P^2 + R^2 \quad (2.17)$$

A potência reativa R por sua vez é composta de duas parcelas ortogonais, Q e D , e expressa da seguinte forma:

$$R^2 = Q^2 + D^2 \quad (2.18)$$

A primeira dessas parcelas é a potência reativa devido à diferença angular entre tensões e correntes de mesma frequência, a qual tem a seguinte definição [3]:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \sum_1^n \frac{1}{n} \int_0^T v \cdot di_n$$

$$Q = \sum \frac{1}{2} \cdot V_n \cdot I_n \cdot \sin(\phi_n) \quad (2.19)$$

A segunda parcela é a potência de distorção harmônica, e pode ser calculada por:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.20)$$

Substituindo nesta expressão os valores de S , P e Q obtidos anteriormente obtém-se,

$$D = \sqrt{\sum_1^{n,m} ((v_n \cdot I_m)^2 + (v_m \cdot I_n)^2 - 2 \cdot v_n \cdot v_m \cdot I_n \cdot I_m \cdot \cos(\phi_n - \phi_m))} \quad (2.21)$$

No caso particular onde a forma de onda da tensão não possui componentes harmônicas, é possível simplificar a expressão acima obtendo-se:

$$D = S \times \sqrt{1 - \left(\frac{I_{1ef}}{I_{ef}}\right)^2} \quad (2.22)$$

Segundo o estudo feito por Budeanu na referência [6], onde é apresentada a teoria na qual a análise mostrada anteriormente está baseada, a potência de distorção surge devido às interações entre as componentes harmônicas e fundamental de tensão e corrente de ordens distintas, as quais incrementam a potência aparente resultante.

Observando-se a figura 2 verifica-se que as potências envolvidas não constituem mais o triângulo convencional, mas sim um tetraedro de potências.

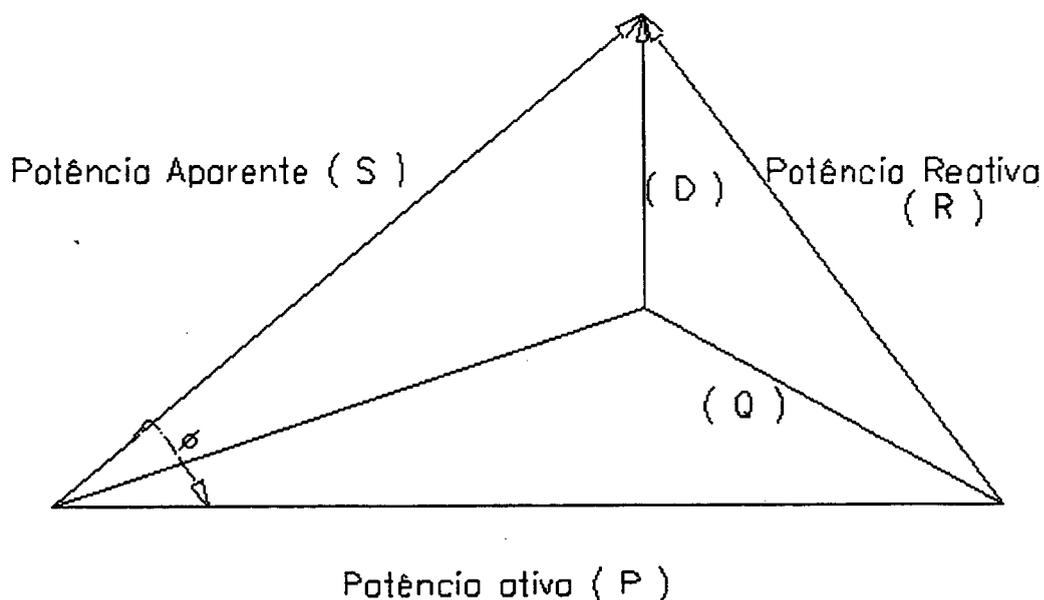


Figura 2. Tetraedro de potências.

É a face frontal deste tetraedro (P - R - S) que se deve levar em conta nos estudos de fluxo de potência. Observa-se também que a compensação de reativos para melhorar o fator de potência não deve ser efetuada somente com respeito à potência reativa Q , mas considerando-se fundamentalmente o termo R . Para a eliminação da distorção harmônica, existe portanto a necessidade da utilização de filtros ativos atuando simultaneamente em Q e D . Na referência [7], é apresentado o funcionamento do filtro ativo monofásico para a correção do fator de potência, tanto em cargas lineares como nas cargas não-lineares. Seu princípio consiste em utilizar a geração de harmônicas que se cancelam com as das cargas não-lineares. Uma vantagem deste equipamento é que a sua conexão em paralelo com as cargas (lineares e não-lineares) pode ser feita com estas já em operação.

A potência de distorção harmônica D se anula quando a impedância de carga apresenta mesmo módulo e fase para todas as frequências. Ou seja, para se alcançar este efeito não se utilizam apenas os capacitores convencionais, mas também filtros ativos.

O fator de potência é expresso como:

$$fp = \cos(\phi) = P / S \quad (2.23)$$

2.1.2.3. Taxa de Distorção Harmônica

Dois índices podem ser utilizados para avaliação da distorção harmônica da forma de onda: um para a tensão e outro para corrente. Estes são dados por :

$$TDHI = \sqrt{\frac{\sum I_i^2(n)_{ef}}{I_i^2(1)_{ef}}} \quad (2.24)$$

que representa a taxa de distorção harmônica da corrente, com base na componente fundamental, como foi definido na página 5, e

$$TDHV = \sqrt{\frac{\sum V_i^2(n)_{ef}}{V_i^2(1)_{ef}}} \quad (2.25)$$

conhecido como taxa de distorção harmônica da tensão.

Em 1984, o Grupo Coordenador para a Operação Interligada - GCOI, do Brasil, baseado nas experiências de países como a Inglaterra e a Nova Zelândia, estabeleceu para sistemas de tensão nominal inferior a 69 kV, os seguintes limites:

Harmônicos pares de tensão: 2% ;

Harmônicos ímpares de tensão: 4% ;

Taxa de distorção harmônica total de tensão: 5% .

Estes limites visam assegurar um desempenho correto e uma vida útil adequada para os equipamentos instalados no sistema elétrico.

2.2. Geração de Harmônicas e Cargas Não-Lineares

A literatura sobre harmônicas mostra que apesar das fontes de energia do sistema serem os geradores síncronos, as harmônicas no sistema elétrico são geradas pelas cargas não-lineares. Conforme mencionado anteriormente, essas cargas em regime permanente, quando alimentadas por uma fonte de tensão senoidal pura, apresentam formas de ondas periódicas de corrente e tensão nos seus terminais, as quais quando decompostas em série de Fourier possuem além da senóide de frequência igual à da fundamental de tensão de excitação, componentes senoidais múltiplos inteiros destas.

Além deste tipo de carga, existem ainda cargas especiais cujas formas de ondas de corrente e tensão não são periódicas. Estas são tipicamente de difícil tratamento analítico, pois não podem ser decompostas numa série de senos e cossenos múltiplos inteiros da componente fundamental.

Segundo a referência [8] as duas principais fontes de harmônicas no sistema de potência são:

- Equipamentos que envolvem chaveamento eletrônico - os conversores estáticos de potência são um exemplo deste tipo de equipamento. Nestes dispositivos, o processo de chaveamento causa uma distorção na forma de onda da corrente chaveada, a qual pode ser estudada via decomposição em série de Fourier;
- Equipamentos com relacionamento não-linear entre tensão e corrente - alguns equipamentos magnéticos como reatores e transformadores operando na saturação são exemplos desses equipamentos. Ainda dentro desta classe, encontram-se as lâmpadas fluorescentes compactas e os fornos a arco. Estes equipamentos quando alimentados por fontes periódicas produzem correntes harmônicas oriundas do relacionamento não-linear entre a tensão e corrente.

Uma apresentação sumária das principais cargas não-lineares e de outras fontes de geração de corrente harmônicas é feita nesta seção.

2.2.1. Conversores

Uma grande quantidade de equipamentos domésticos (por exemplo, aparelhos de som, televisores, videocassetes e microcomputadores) utilizam corrente contínua para o funcionamento de seus circuitos eletrônicos, e assim uma retificação da corrente alternada é necessária. Os circuitos que cumprem esta função são os circuitos retificadores, os quais podem apresentar várias ligações dos seus diodos ou tiristores (pontes retificadoras monofásicas ou trifásicas a diodo, pontes retificadoras monofásicas ou trifásicas a tiristores) onde há uma ação de controle. O sinal proveniente deste estágio é filtrado por capacitores ou indutores ou ainda por uma combinação destes, a fim de reduzir a ondulação da corrente na carga. Nas referências [9] e [10] encontram-se maiores detalhes sobre tais estruturas. As ações dos filtros somadas as comutações causadas pelos semicondutores (diodos e tiristores) provocam o aparecimento de correntes com componentes harmônicas, e suas amplitudes dependerão do tipo de estrutura retificadora utilizada, do filtro de saída e da carga no lado DC. As frequências harmônicas características geradas pela estrutura são obtidas com o auxílio da equação (2.1). Neste ponto, deve-se lembrar que estruturas em ponte trifásica,

segundo as referências [8] e [11], sob condições desequilibradas das tensões de alimentação ou impedâncias equivalentes diferentes em cada uma das fases na entrada da estrutura retificadora, causam o aparecimento de harmônicas não características, ou seja, correntes com frequência diferente das calculadas sob condições equilibradas. A referência [16] mostra a forma de onda, o seu espectro de frequência e a taxa de distorção harmônica da corrente para várias estruturas retificadoras. Nas referências [1] e [2] são apresentadas as fórmulas para o cálculo das amplitudes das correntes harmônicas como função da corrente CC da carga, do ângulo de disparo do tiristor e do ângulo de comutação. Embora estas fórmulas sejam de grande valia na análise das harmônicas de uma estrutura, elas não são suficientes para serem empregadas ao sistema de potência pois não trazem informações sobre a fase da corrente.

2.2.2. Fornos a Arco

Os fornos a arco são usados pelas indústrias metalúrgicas principalmente para a produção do aço. Sua utilização intensificou-se nas últimas duas décadas devido à crise energética causada pelo petróleo na época.

Um arco é uma descarga elétrica num gás, caracterizado por uma baixa tensão nos eletrodos e uma alta corrente. Para correntes muito baixas o arco tende a se extinguir e a tensão do arco passa a assumir a forma de onda imposta pela tensão do sistema. O comprimento do arco também varia durante as fases do processo metalúrgico que compreendem a ignição do arco, isto é, a fusão do metal, o refinamento do metal e a extinção do arco. Durante estas etapas, devido às mudanças bruscas na forma de onda da corrente, são geradas as harmônicas, as quais são imprevisíveis devido às variações aleatórias ciclo a ciclo do arco. Devido a esta característica, os níveis harmônicos são fornecidos por dados estatísticos obtidos ao longo de anos de utilização dos fornos a arco. A tabela 1, transcrita da referência [11] fornece a faixa de amplitudes médias, além da amplitude máxima para cada harmônica como percentuais da componente fundamental.

ORDEM HARMÔNICA	AMPLITUDE MÉDIA(%)	AMPLITUDE MÁXIMA(%)
2	3 -----9	30
3	6 ----- 10	20
4	2 ----- 6	15
5	2 -----10	12
6	2----- 3	10
7	3 -----6	8
9	2 -----5	7

Tabela 1. Amplitude das harmônicas produzidas por fornos a arco.

As referências [12] e [13] fornecem informações mais detalhadas sobre os fornos a arco. O artigo [14] apresenta uma metodologia para a representação de cargas com características não-lineares entre corrente e tensão, com tratamento matemático não convencional das não linearidades (forno a arco, transformadores, lâmpadas compactas etc), comumente encontradas nos sistemas de energia elétrica. No presente trabalho serão apresentados apenas os principais componentes intrínsecos ao processo ocorrido no forno a arco descritos na referência [15].

A representação monofásica do forno a arco é mostrada na figura 3.

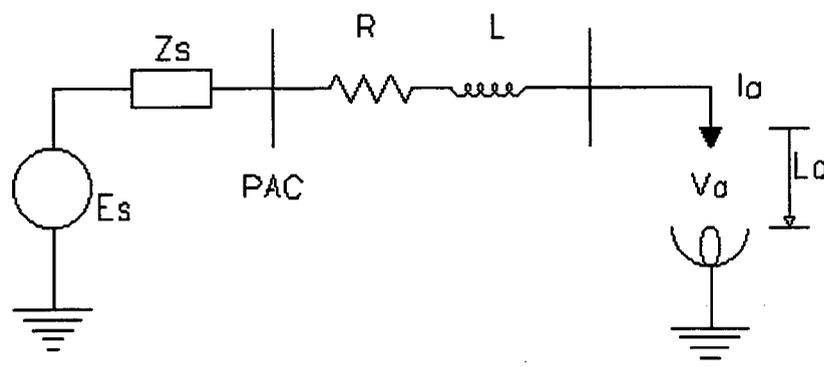


Figura 3 - Diagrama unifilar do forno a arco.

Nesta figura, E_s é a tensão de excitação senoidal do sistema de energia; Z_s é a impedância equivalente do sistema de energia até o ponto de acoplamento comum; PAC é o ponto de acoplamento comum; R e L são respectivamente a resistência e a indutância do forno; I_a é a corrente; V_a é a tensão nos terminais dos eletrodos no qual se estabelece o arco; e L_a é o comprimento do arco (afastamento dos eletrodos).

Basicamente resolve-se a equação diferencial que relaciona a corrente e a tensão de excitação senoidal em um circuito R-L, onde a resistência que representa o arco elétrico é não-linear e obedece a equação fasorial (2.26) de Ayrton

$$V_a = (A + B)L_a + (C + D) \times L_a / I_a \quad (2.26)$$

Nesta expressão, os parâmetros A , B , C e D são relativos ao meio em que se forma o arco. Observa-se que a tensão de arco (V_a) é controlada diretamente pelo comprimento do arco (L_a) e de maneira inversa pela corrente (I_a). Oscilogramas mostram que a corrente I_a e tensão de arco V_a estão em fase, porém com formas de ondas distintas, o que pressupõem uma resistência não-linear no modelo do forno.

Também é verificado que, durante a ocorrência do arco, a tensão de arco (V_a) tem uma forma de onda aproximadamente quadrada, e que na sua extinção esta tensão assume a forma de onda senoidal imposta pela fonte de tensão de excitação. A figura 4 ilustra este comportamento.

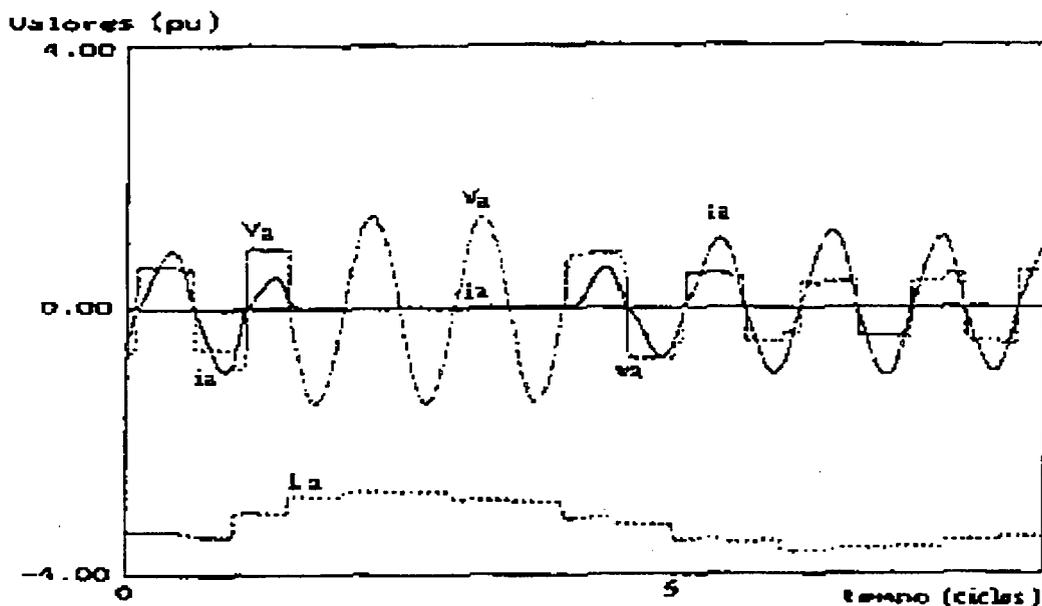


Figura 4 - Tensão $V_a(t)$ e corrente $I_a(t)$ como função do comprimento do arco L_a

Para estabilizar a corrente, é acrescentada ao circuito do forno a arco uma lei de controle do comprimento do arco (L_a), a qual possibilita a operação em malha fechada indicada pela figura 5.

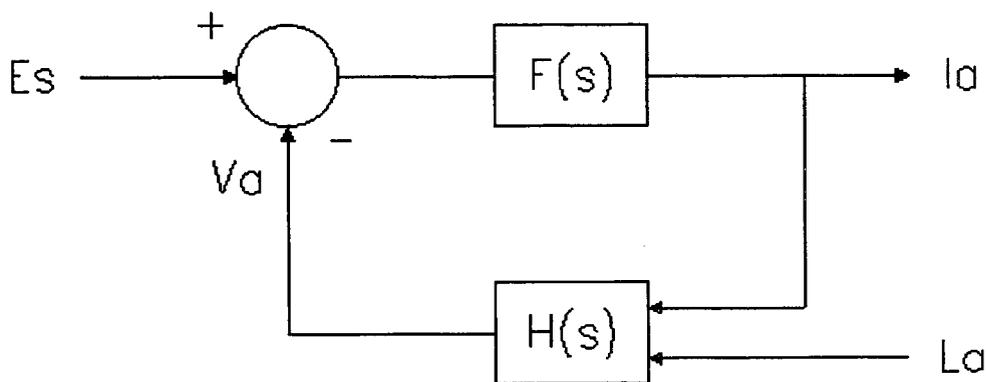


Figura 5 -Diagrama de blocos do forno a arco.

A função de transferência $F(s)$ representa a rede que conecta a fonte de tensão senoidal (E_s) ao forno a arco, e $H(s)$ representa o modelo de Ayrton para o arco. Conforme mostrado na figura 4, variando-se o comprimento do arco (L_a) modificam-se as condições de operação do forno, simulando as diferentes fases do processo metalúrgico (ignição, fusão, refino e extinção do arco). Se um consumidor estiver conectado ao ponto PAC , o mesmo

experimentará o fenômeno “FLICKER“ ou cintilação da tensão, percebida na luminosidade das lâmpadas, e também o efeito das correntes harmônicas na tensão.

2.2.3. Compensadores Estáticos de Reativo Controlados por Tiristores

O reator controlado por tiristores (*RCT*) é utilizado visando principalmente a compensação de reativos em fornos a arco e a manutenção do nível da tensão. Também são objetivos do seu uso, a melhoria da estabilidade do sistema, a redução do FLICKER na tensão (causado pelos fornos a arco por exemplo), a melhoria do fator de potência das instalações, e a correção dos desbalanços de fase no sistema.

O *RCT* é formado por dois tiristores em conexão anti-paralela, em série com o reator, como indicado na figura 6.

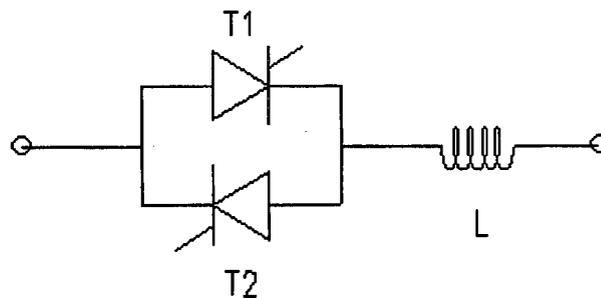


Figura 6 - Circuito de um RCT.

Pelo controle da corrente elétrica nos reatores, o qual é executado mediante o comando do ângulo de disparo dos tiristores, é possível obter diferentes características de compensação, podendo as mesmas serem indutivas ou capacitivas, e ainda variando de forma contínua. Os dois tiristores conduzem alternadamente a cada meio ciclo da frequência fundamental do sistema, e a duração de cada condução depende do instante que é feito o disparo (ângulo α). Assim, quando o tiristor *T1*, que estabelece a condução do pulso de corrente positiva, for disparado em α graus, o tiristor *T2* deverá ser disparado em $\gamma = \pi + \alpha$, mantendo desta forma o mesmo intervalo de condução para cada um dos pulsos de corrente. Fora do intervalo de condução a corrente de alimentação é nula. Desta forma, estabelece-se uma relação não-linear entre a tensão e a corrente no *RCT* a qual produz correntes harmônicas no sistema. Caso ocorra um desvio no tempo de disparo, uma corrente contínua circulará pela rede elétrica.

Conforme a referência [17], a qual mostra o desempenho do *RCT* em condições assimétricas de operação e a sua interação com o sistema alimentador (transformador de alimentação), quando o *RCT* estiver operando sob condições desequilibradas e gerando uma componente contínua além de um conteúdo harmônico na sua corrente de alimentação, o seu transformador alimentador, por estar sujeito à corrente contínua que promove sua operação assimétrica (desequilíbrio entre as tensões), passa a operar na saturação e desta forma também será uma fonte adicional de harmônicas para o sistema de energia. Isto por sua vez, interfere no comportamento do sistema de compensação do *RCT*. Devido ao problema citado, novas metodologias de cálculo de fluxo de potência harmônico, passaram a se basear em fluxos de potência multifásicos para levar em conta o problema de desbalanceamento entre as fases, o que faz aparecerem harmônicas não características que se somam às harmônicas características distorcendo ainda mais as formas de onda de correntes e tensões ao longo do sistema elétrico. A referência [18] aborda este problema considerando o *RCT* como exemplo de uma carga não-linear.

A faixa de operação para o ângulo de disparo (α), está compreendida entre $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$, com $\alpha = \pi$ na condição de bloqueio e $\alpha = \frac{\pi}{2}$ na condição de condução plena.

O ângulo de condução é determinado por:

$$\sigma = 2 \times (\pi - \alpha) \tag{2.27}$$

Como normalmente σ é menor que 180° , um comportamento não-linear entre a tensão e corrente é criado. A figura 7 ilustra as tensões e correntes harmônicas geradas pelo *RCT*.

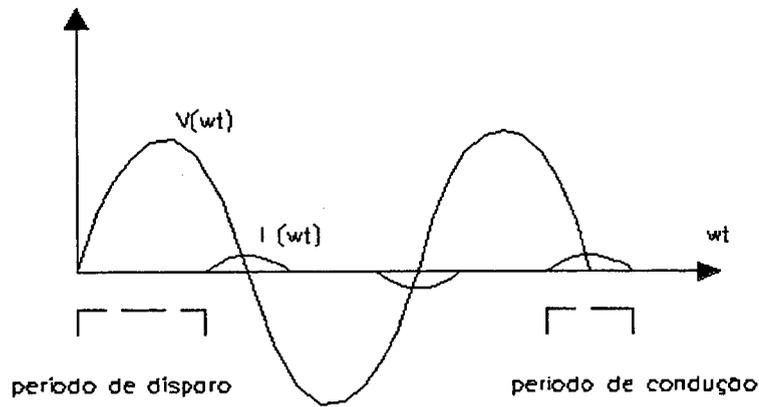


Figura 7 - formas de onda de V e I no RCT.

As componentes harmônicas produzidas pela condução parcial da corrente no RCT, sob condições balanceadas para cada par de tiristores em cada fase, e disparos sincronizados, segundo a referência [2], podem ser determinadas por:

$$I_h = \frac{4}{\pi} \times \frac{V}{X} \left[\frac{\sin(h+1)}{2(h+1)} \times \alpha + \frac{\sin(h-1)}{2(h-1)} \times \alpha - \cos(\alpha) \times \frac{\sin(h \times \alpha)}{h} \right] \quad (2.28)$$

onde, h é a ordem harmônica (3 , 5 , 7 , 9..... (ímpar)); V é a tensão de linha; X é a reatância indutiva dos reatores por fase.

2.2.4. Elos de Corrente Contínua (CC)

Os elos de corrente contínua (High Voltage Direct Current Links, ou HVDC Links) desempenham na atualidade um papel importante na transmissão de energia a longa distância. Dentre as suas principais características, pode-se citar o bom desempenho transitório (não apresenta problemas de estabilidade), as baixas perdas na transmissão, e a possibilidade de interligar sistemas com frequências diferentes aliado à possibilidade do controle de intercâmbio de potência ativa. Essas características fizeram o número de conexões de diferentes sistemas CA em corrente contínua aumentar nos últimos tempos.

Por outro lado, a característica dos conversores HVDC é não-linear, ou seja, estes componentes também geram correntes harmônicas, conforme visto na seção 2.2.1. Assim, a transmissão em corrente contínua aumenta o conteúdo harmônico no sistema de energia, e

medidas devem ser tomadas para evitar estes problemas, durante a fase de projeto destes elos. Para esta finalidade, deve-se em primeiro lugar obter a solução das equações da rede elétrica considerando as componentes harmônicas através de um programa computacional de Fluxo de Potência. Com isto, pode-se avaliar o nível do sinal gerado. Em seguida, calcula-se o conteúdo harmônico para uma especificada ação corretiva. Um fluxo de potência harmônico trifásico é proposto em [19], para a obtenção do conteúdo harmônico gerado em sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC), utilizando-se o método de Newton modificado para resolver dois sistemas AC separados pelo sistema HVDC.

2.2.4.1. Funcionamento do Elo CC

Uma apresentação sumária do funcionamento e das principais equações de um elo de corrente contínua é feita na referência [20]. A figura 8 mostra o esquema de um elo de corrente contínua interligando dois pontos de um sistema CA.

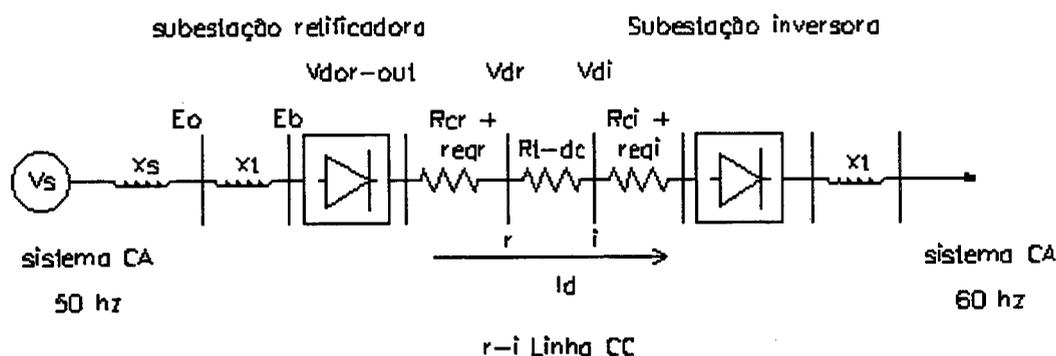


Figura 8 - Diagrama unifilar de um elo de corrente contínua.

Na figura 8, V_{dr} e V_{di} são as tensões contínuas nas extremidades da linha de transmissão CC, nos lados retificador e inversor, respectivamente; α e γ são os ângulos de disparo e extinção dos tiristores do retificador e inversor, respectivamente; R_{cr} e R_{ci} são as resistências associadas à comutação; e r_{eqr} e r_{eqi} são as resistências equivalentes dos conversores de seis pulsos associados com as perdas ativas nos tiristores. Nesta representação, existem dois terminais chamados de conversores. O primeiro é o retificador e o último é o inversor, os quais são representados como barras no sistema CA. Estes terminais permitem o controle de potência na linha C.C. pelo controle da corrente e tensão nas subestações conversoras, compostas pelo transformador com tapes e pela associação em série de mais de

uma ponte de tiristores de seis pulsos (chamada ponte de Graetz). Na subestação retificadora a tensão alternada é retificada dando origem a um fluxo de corrente contínua na rede CC. Esta por sua vez é representada simplesmente por uma resistência (R_{t-dc}) entre as duas subestações conversoras. No lado inversor a corrente contínua é transformada em alternada, provocando um fluxo de potência na rede CA conectada a este lado.

A referência [2] fornece a expressão (2.28), mostrada a seguir, para a obtenção da corrente harmônica em um conversor de seis pulsos a tiristor, considerando o fenômeno da comutação e assumindo uma corrente contínua (I_d) sem ondulação.

$$I_h = I_d \times \left\{ \sqrt{\frac{6}{\pi} \times \frac{\sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \times \cos(2\alpha + \mu)}}{h \times [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)]}} \right\} \quad (2.28)$$

onde,

h é um número inteiro e ímpar ($h = 1, 3, 5, \dots$)

$$A = \frac{\text{sen}\left[(h-1) \times \frac{\mu}{2}\right]}{h-1}$$

Observação: $h = 1$ implica em $A = \frac{\mu}{2}$

$$B = \frac{\text{sen}\left[(h+1) \times \frac{\mu}{2}\right]}{h+1}$$

2.2.5. Transformadores e Reatores de Núcleo Saturado

Equipamentos magnéticos operando sob condições normais em regime permanente, não causam distorções na rede elétrica. Porém, durante os distúrbios transitórios aos quais eventualmente a rede está sujeita, tais equipamentos podem operar fora da sua faixa nominal, podendo inclusive aumentar a contribuição na geração de ondas harmônicas no sistema. Portanto o efeito da saturação nos transformadores pode produzir harmônicas na corrente do sistema de energia.

A determinação das correntes harmônicas nestes equipamentos é mais complexa do que nos conversores estáticos. Suas magnitudes podem ser encontradas através de programas computacionais de análise de transitórios eletromagnéticos (*EMTP*), ou por aproximação

linear dos efeitos não-lineares do circuito magnético para obtenção do regime permanente, conforme é sugerido na referência [21].

A seguir é explicado o surgimento de harmônicas em transformadores, operando sob condições de saturação, estudo apresentado da referência [3].

2.2.5.1. Transformador a Vazio

Ao se energizar o primário de um transformador sem carga no seu secundário, uma pequena corrente surge no seu primário devido ao fluxo magnetizante e às perdas no ferro. No presente estudo estas são desprezadas. Assim, a tensão do primário do transformador é balanceada pela FEM no transformador uma vez que a resistência dos enrolamentos e a indutância de dispersão são desprezíveis devido à baixa corrente. Isto é analiticamente expresso como

$$v = -e = -E_m \sin(\omega t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.29)$$

Desta equação pode-se obter a expressão do fluxo magnético, ou seja,

$$\phi = - \int e_{1/N_1} dt = E_{m/N_1\omega} \cos(\omega t) = \phi_m \cos(\omega t) \quad (2.30)$$

Assim a tensão senoidal no primário produz um fluxo também senoidal. A corrente no primário poderá não ser puramente senoidal uma vez que a relação entre o fluxo e a corrente magnetizante é não-linear quando atingida a saturação.

2.2.5.2. Não linearidade na magnetização do transformador

Na ausência da histerese no núcleo do transformador, o fluxo se relaciona com a corrente magnetizante pela curva de magnetização do ferro utilizado nas lâminas que compõem o circuito magnético do transformador (núcleo), conforme ilustra a figura 9(a). Na figura 9(b) é apresentada a forma de onda da corrente magnetizante no tempo, determinada ponto a ponto pela relação da figura 9 (a). Nesta figura, observa-se uma forma de onda próxima da senoidal, mas não puramente senoidal.

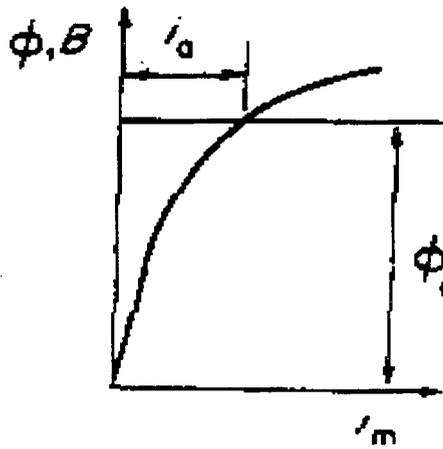


Figura 9 (a) - Curva de magnetização

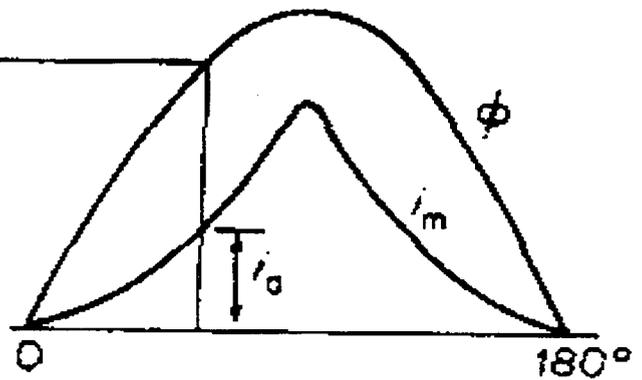


Figura 9 (b) - Formação não-linear da corrente magnetizante

Quando o efeito da histerese é incluído, conforme indicado na figura 10, a corrente magnetizante é mais distorcida do que a da figura 9(b).

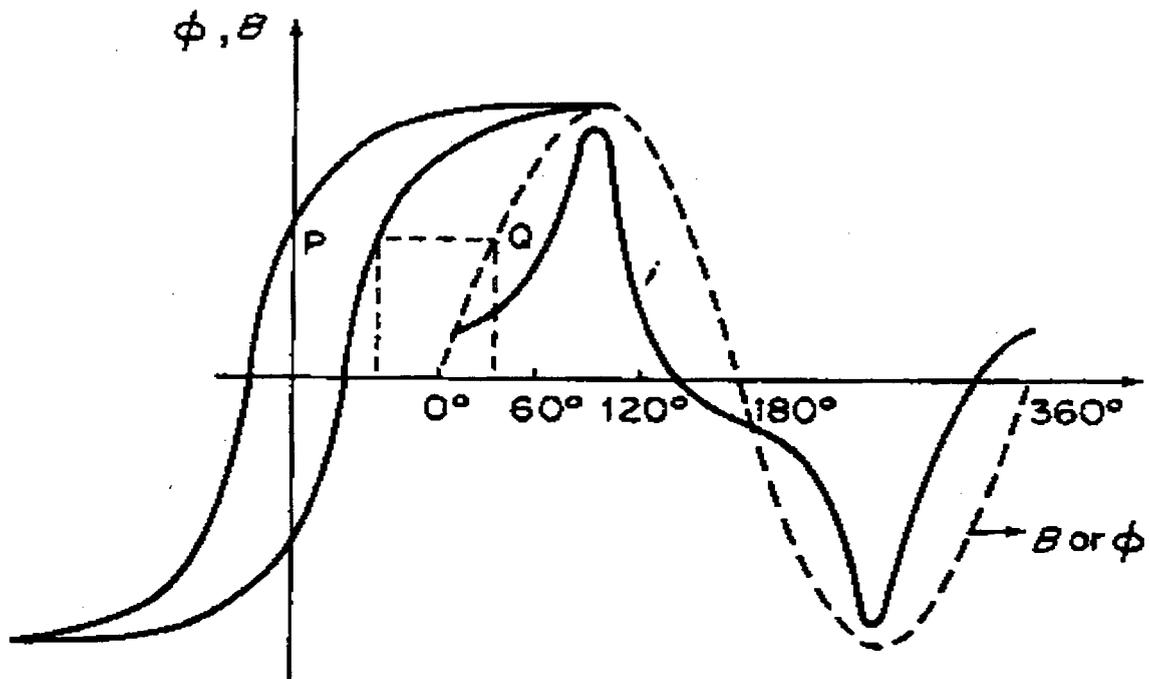


Figura 9 -Efeito da Histerese na corrente magnetizante.

As distorções são causadas pelas correntes harmônicas múltiplas de três, particularmente pela terceira, uma vez que as demais harmônicas são atenuadas. E para que se possa manter um fornecimento de tensão aproximadamente senoidal é necessário filtrar estas harmônicas, o que é conseguido nos transformadores trifásicos através do uso da conexão

triângulo das suas bobinas. Embora se consiga eliminar as correntes harmônicas múltiplas de três, correntes com amplitudes significativas (5 a 10 % da fundamental) de quinta e sétima harmônicas continuam circulando, provocando visíveis distorções, e por isso não devem ser ignoradas. As amplitudes harmônicas da corrente magnetizante aumentam nas primeiras horas da manhã, em virtude do baixo carregamento do sistema altas tensões aparecem, fazendo os transformadores operarem na saturação.

Para um melhor desempenho do transformador, os materiais magnéticos do núcleo devem apresentar uma alta permeabilidade magnética na região não saturada, o que diminui o efeito da histerese, e uma permeabilidade baixa e constante na região saturada, sendo escolhido normalmente para o cumprimento de tais funções o aço de grãos orientados laminados a frio. A densidade de fluxo máxima na região linear para este material é de 1,7 Tesla. Se o transformador estiver alimentado por uma tensão 30% acima do seu valor nominal o material magnético estará sujeito a uma densidade de fluxo da ordem de 2,0 Tesla. Assim, o transformador estará operando sob considerável saturação, ocorrendo um aumento nas amplitudes harmônicas da corrente magnetizante.

2.2.5.3. Corrente de “Inrush”

Quando o transformador é desligado, ele pode reter no seu circuito um magnetismo residual. No seu religamento a densidade de fluxo pode ser levada a valores situados na faixa de 3,4 a 4,7 Tesla. Comparando estes valores com o nível de saturação da curva característica do material magnético (2,05 Tesla) verifica-se uma extrema saturação. Este efeito aumenta a corrente magnetizante de 5 a 10 vezes o seu valor normal de operação. A diminuição da corrente de “*inrush*” com o tempo é uma função da resistência do enrolamento primário, e para a maioria dos transformadores a duração deste fenômeno leva alguns segundos, devido a suas baixas resistências.

O conteúdo harmônico da corrente varia com o tempo entre valores máximos (próximos ao instante da energização) e nulos até que se atinja o regime permanente. Nesta condição o conteúdo harmônico é uma função da amplitude da tensão do sistema.

2.2.6. Lâmpadas Fluorescentes Compactas

As lâmpadas fluorescentes proporcionam uma razoável economia de energia em comparação com as lâmpadas incandescentes, e são indicadas em programas e campanhas de conservação de energia. Porém, a preocupação associada à utilização das lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) é o alto nível de distorção harmônica na corrente. A referência [22] apresenta uma classificação para as LFCs, onde são mostradas as formas de onda típicas da corrente, seu espectro harmônico e a taxa de distorção para cada uma das classes. Na mesma referência, um estudo feito a fim de verificar o efeito das harmônicas oriundas das LFCs em um sistema de distribuição com auxílio do aplicativo computacional EMTP, indicou as seguintes ocorrências:

1. As altas penetrações harmônicas inerentes às LFCs podem resultar em níveis de distorção da tensão inaceitáveis para o sistema de distribuição (maior que 5%);
2. Os níveis de distorção são acentuadamente dependentes da condição de operação do sistema;
3. A configuração dos bancos de capacitores podem causar ressonância no sistema, o que aumenta a amplitude da componente harmônica específica;
4. A resposta do sistema é também influenciada pela representação das cargas eletrônicas.

2.3. Efeitos de Ondas com Conteúdo Harmônico

A tolerância relativa à amplitude das harmônicas que circulam na rede deve ser determinada pela sensibilidade dos elementos do sistema elétrico de potência (cargas, transformadores, geradores, compensadores, medidores, dispositivos de proteção, aparelhos de comunicação e de processamento de dados etc) com relação a estas harmônicas [3, 2, 11]. Esta sensibilidade aparece em razão desses equipamentos serem projetados para operarem sob condições de ondas puramente senoidais. As ondas harmônicas podem causar sobreaquecimento nos condutores e sobretensões nos dielétricos destes equipamentos. Assim, um envelhecimento prematuro e possível falha de isolamento pode ocorrer nos equipamentos ligados à rede elétrica, causando sua perda, caso tais níveis de harmônicas não sejam filtrados da rede.

Nesta seção, serão vistos alguns registros descritos pela literatura sobre os efeitos (problemas de funcionamento) causados em alguns equipamentos ligados ao sistema de potência, quando estes estão sujeitos a formas de ondas distorcidas.

2.3.1. Sistemas de Transmissão

Um dos efeitos causados pela circulação de correntes harmônicas nos condutores da rede é o aumento das perdas. Isto é provocado pelo aquecimento dos condutores em virtude do aparecimento do efeito pelicular, também conhecido como efeito “*skin*”, o qual tende a aumentar a resistência efetiva dos condutores da linha à medida que a frequência aumenta. Tal fenômeno é descrito com mais detalhes na seção 3.3.1. O aumento das perdas ocasionadas pelo mesmo é dado por

$$\Delta P = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \times R_n \quad (2.31)$$

Outro efeito da circulação das ondas harmônicas no sistema de potência é o aparecimento de ruídos audíveis perto dos isoladores e a possibilidades de fadiga de seus dielétricos.

2.3.2. Efeitos nos Motores e Geradores

O principal efeito das correntes harmônicas em máquinas rotativas é o aquecimento provocado pelas perdas no ferro e no cobre, o que causa uma redução da eficiência da máquina. A corrente harmônica circulando nos enrolamentos do estator induz correntes harmônicas nos enrolamentos do rotor, ou no enrolamento de campo (máquinas síncronas), e nas barras curto-circuitadas do rotor. A circulação destas correntes provoca aquecimento, o qual é acentuado pelo efeito “*skin*”. Estes efeitos são mais graves em rotores bobinados do que nos de gaiola de esquilo. Os geradores são muito sensíveis a tensões distorcidas pois o circuito elétrico do rotor é projetado para suportar correntes alternadas somente na partida, sendo equipados com alarmes regulados para uma pequena porcentagem da corrente nominal. As correntes harmônicas também provocam um aumento de ruídos audíveis, que surgem pelo

aumento de vibrações das lâminas de ferro, que compõem o circuito magnético do estator e rotor.

Utilizando a transformação de componentes simétricos para o estudo de curto-circuito (ou desequilíbrios na rede) em uma onda distorcida de corrente, obtêm-se as seguintes ordens harmônicas para a seqüência positiva: $n = \mathbf{1}, 4, \mathbf{7}, 10, \mathbf{13}, \dots$, seqüência negativa: $n = 2, \mathbf{5}, 8, \mathbf{11}, \dots$, e seqüência zero $n = \mathbf{3}, 6, \mathbf{9}, 12, \dots$, onde os termos em negrito sublinhado correspondem às harmônicas características geradas pelos equipamentos retificadores.

Os campos magnéticos criados pelas correntes de seqüência positiva têm um efeito motor ou acelerante, porque produzem torques de mesmo sentido que o torque criado pela componente fundamental. Por outro lado, os de seqüência negativa produzem efeitos contrários e os de seqüência zero não contribuem para o movimento, apenas aumentam as perdas no rotor.

- O escorregamento referido à velocidade síncrona é calculado por

$$S(1) = \frac{f_0 - f_r}{f_0} \quad (2.32)$$

e a freqüência do rotor é calculada como

$$\begin{aligned} f_0 \times S(1) &= f_0 - f_r \\ f_r &= f_0(1 - S(1)) \end{aligned}$$

O escorregamento referente à freqüência harmônica é dado por:

$$\begin{aligned} S(n) &= \frac{n \times f_0 - f_r}{n \times f_0} \\ S(n) &= \frac{n \times f_0 - (f_0(1 - S(1)))}{n \times f_0} \\ S(n) &= \frac{n \pm (1 - S(1))}{n} \end{aligned} \quad (2.33)$$

onde, f_0 é a freqüência fundamental, f_r é a freqüência do rotor, $S(1)$ é o escorregamento na

fundamental, $S(n)$ é o escorregamento na ordem harmônica, e n é a ordem harmônica .

Segundo a referência [3], o torque criado por uma corrente harmônica é dado por

$$T_n = (I_n^2 \times r'_{2n} / n \times S(n)) \quad (2.34)$$

onde o sinal de n indica a direção do torque.

A medida que a ordem harmônica aumenta o escorregamento $S(n)$ tende a um, permitindo neste caso as seguintes aproximações:

$$\begin{aligned} Z_n &\approx n \times X_1 \\ I_n &= V_n / n \times X_1 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Estas aproximações são melhor interpretadas analisando-se o circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico, apresentado na seção 3.2.4 que apresenta este circuito modelado para o estudo de harmônicas.

A expressão do torque passa a ser uma função da tensão harmônica e da ordem harmônica, conforme é indicado a seguir.

$$T_n = (V_n^2 \times r'_{2n} / n^3 \times X_1^2) \quad (2.36)$$

Desde que o escorregamento na frequência harmônica é unitário e a impedância da máquina aumenta com a frequência, a amplitude da circulação de corrente harmônica é reduzida, o que resulta em um torque harmônico muito pequeno comparado com o produzido pela corrente fundamental. Além disto, estes torques harmônicos acontecem aos pares (no tempo). Por exemplo, componentes de 5ª e 7ª ordem, que têm sentidos opostos, tendem assim a se cancelar, conforme mostra a figura 11. Portanto o efeito das harmônicas sobre o torque principal é desprezível.

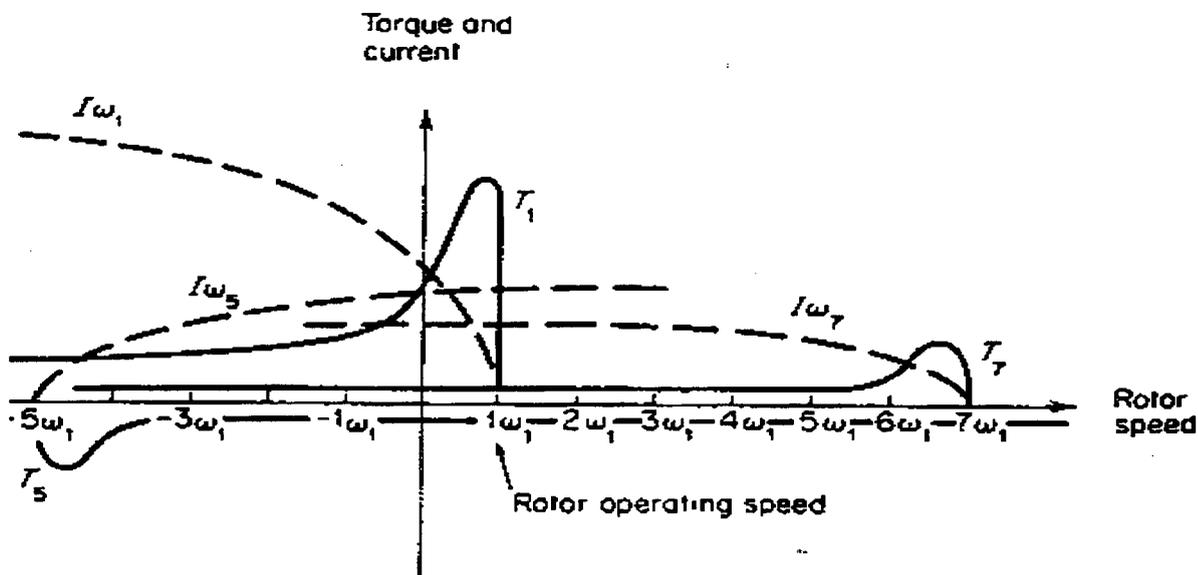


Figura 11 - Torque e corrente harmônica no rotor.

Alguns pares harmônicos, como os de 5ª e 7ª ordem e também os de 11ª e 13ª ordem, podem criar oscilações mecânicas na turbina de um gerador ou no eixo do sistema formado pelas inércias motor-carga. Estes torques de oscilação são criados pela interação entre as correntes harmônicas e o campo magnético de frequência fundamental, quando a máquina possui uma componente de tensão de alimentação na frequência de ressonância.

Por exemplo, a 5ª e a 7ª harmônicas podem se combinar para produzir um estímulo torcional no rotor numa frequência de 6ª harmônica. Isto acontece porque a corrente de 5ª harmônica produz um campo girante e oposto, na velocidade síncrona, o que resulta em uma velocidade relativa vista no rotor com frequência seis vezes maior que a fundamental. Efeito similar ocorre devido à 7ª harmônica. Neste caso, aparecem correntes no rotor com frequência igual a seis vezes à da fundamental. Ou seja, torques pulsantes aparecem no eixo da máquina, afetando a qualidade de produtos no caso dos processos industriais, resultantes de cargas acopladas ao eixo do motor e sensíveis a tais variações.

Uma expressão aproximada para o cálculo da magnitude do torque pulsante em *p.u.* baseada na tensão nominal 1,0 *p.u.*, desenvolvida por Williamson [23], é representada por

$$T_{3k} = [I_{n+}^2 + I_{n-}^2 - 2 \times I_{n+} \times I_{n-} \times \cos(\phi_{n+} - \phi_{n-})]^{1/2} \quad (2.37)$$

onde, I_{n+} é a corrente de seqüência positiva em *p.u.*, I_{n-} é a corrente de seqüência negativa

em *p.u.* Esta expressão permite avaliar possíveis problemas com vibrações torcionais.

Portanto, as correntes harmônicas podem causar uma redução de eficiência e também da vida útil das máquinas devido a dois fatores: o aquecimento resultante do efeito “*skin*” nos enrolamentos do rotor, estator, e barras em curto-circuito, no ferro das partes magnéticas, e o torque pulsante.

2.3.3. Transformadores

A presença de tensões harmônicas aumenta as perdas por histerese e correntes parasitas acrescidas ao efeito Joule no cobre dos condutores (efeito “*skin*”) dos enrolamentos de alta e baixa tensão. O aquecimento juntamente com as sobretensões provenientes da circulação harmônica podem produzir desgaste no isolamento. Um importante efeito causado pelo transformador é aquele devido à conexão dos enrolamentos trifásicos. Este efeito benéfico pode ocasionar o isolamento elétrico das correntes harmônicas múltiplas de três que ficam circulando pelos mesmos quando conectados em triângulo.

Sob certas condições de sobrecarga ou na sua energização (corrente de *inrush*), o transformador opera na região de saturação da sua curva de magnetização o que produzirá uma não-linearidade entre a tensão e corrente, evidenciando assim uma geração de harmônicas.

2.3.4. Dispositivos de Proteção

A ocorrência da operação indevida de relés eletromecânicos e estáticos de sobrecorrente sob influência de sinais harmônicos foi documentada em [24]. No caso relatado nesta referência, os relés de sobrecorrentes estáticos foram acionados com apenas 80% do valor nominal da corrente de “pick-up”, quando a corrente continha 40% de componentes harmônicas em relação à sua fundamental. Em virtude disto, uma nova tecnologia de relés é apresentada na referência [25], onde são feitas observações sobre o benefício do sistema de proteção no desempenho de um sistema elétrico e seus desligamentos indesejáveis quando na presença de formas de ondas distorcidas. Os relés numéricos são sugeridos pela quantidade de recursos incorporados tais como: flexibilidade de ajuste, supressão de transitórios da rede e de

transformadores de instrumentos através de filtragem numérica e auto-teste entre outros. Isto propicia um novo campo de estudos chamado Proteção Adaptativa, o qual abre grandes expectativas em torno da utilização de relés em sistemas especialistas e redes neurais. Basicamente este tipo de proteção consistiria em estabelecer alguns padrões para as grandezas elétricas (tolerância aos desvios de magnitude de tensão e de frequência, distorções harmônicas de corrente e tensão, etc), tal que após a sua percepção a proteção ao sistema fosse então ajustada.

Segundo a referência [11], existem registros de desarmes falsos de disjuntores atribuídos a correntes distorcidas. Devido à circulação de tais correntes pelo tanque de um disjuntor, um sobreaquecimento foi verificado, devido ao efeito pelicular, o qual afetou a calibração do desarme do dispositivo térmico. Também é constatado que o mecanismo do dispositivo térmico é mais sensível a correntes harmônicas do que sua calibração a 60 Hz.

2.3.5. Medidores Analógicos

Os registradores dos medidores analógicos de energia são afetados pela circulação de correntes distorcidas, as quais provocam um torque indevido no disco de indução. Como este é projetado para operar sob condições sinusoidais a existência de distorção nas formas de onda de corrente e tensão faz com que o equipamento registre uma quantidade portadora de erro. Este erro é agravado pela amplitude harmônica e pelo grau de distorção da forma da onda. Dentro do grau de distorção aparecem dois fatores indicativos de ampliação do erro. O primeiro é o intervalo no qual existe um valor nulo da forma de onda, e o segundo é relativo à taxa de crescimento da forma da onda. Isto é, quanto mais brusca for a transição do valor nulo da corrente até seu valor pleno, ou seja intervalos de tempos muito pequeno, maior será o erro.

2.3.6. Ocorrência de Ressonância

Sob condições de frequência fundamental (síncrona), o comportamento do sistema de potência é de natureza indutiva, e o equivalente do sistema é baseado na potência de curto-circuito. Quando a rede de energia elétrica está sujeita a frequências harmônicas, fenômenos indesejáveis, alguns dos quais já mencionados nesta seção, podem ocorrer. Para diminuir tais efeitos o conhecimento do sistema elétrico e do modelo de seus componentes na frequência são necessários.

Devido às condições de carregamento e à configuração topológica da rede em um ponto de operação, a impedância equivalente da rede medida em um certo barramento do sistema pode apresentar uma resposta em frequência semelhante àquela indicada na figura 12.

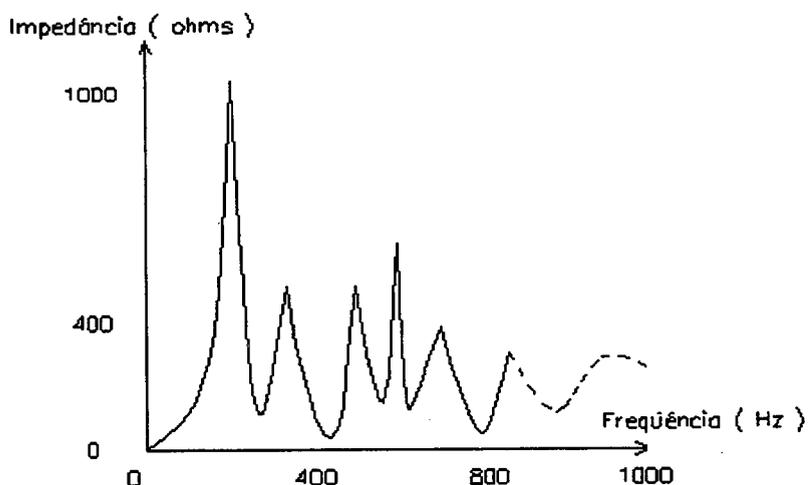


Figura 12- Variação da impedância equivalente medida em um ponto do sistema com a frequência.

As variações no módulo da impedância equivalente aparecem devido à topologia do sistema, constituída por resistências, indutâncias e capacitâncias, dispostas de forma a originarem ressonâncias em determinadas frequências.

A multa aplicada aos consumidores que operam com fator de potência abaixo do limite especificado pela norma técnica (o qual passou em 1993 para 0,93), obrigou um aumento do número de bancos capacitivos instalados no sistema elétrico. A aplicação

conjunta desta medida com as cargas não-lineares existentes na própria instalação ou em instalações vizinhas, todas fontes de ondas harmônicas, requerem cuidados especiais no que tange à possibilidade de ressonância provocada pela adição de tais bancos à rede elétrica. Durante a ressonância, ocorre a amplificação das ondas distorcidas, pois é a resistência quem limita a corrente durante o fenômeno. Existem duas formas de ressonância, a série e a paralela, as quais são descritas a seguir[4].

2.3.6.1. Ressonância Série

Neste caso, a adição de um capacitor C em série com a carga RL , conforme ilustrado na figura 13, produz uma frequência de ressonância dada por

$$\omega_0 = \frac{1.0}{\sqrt{L \times C}} \quad (2.38)$$

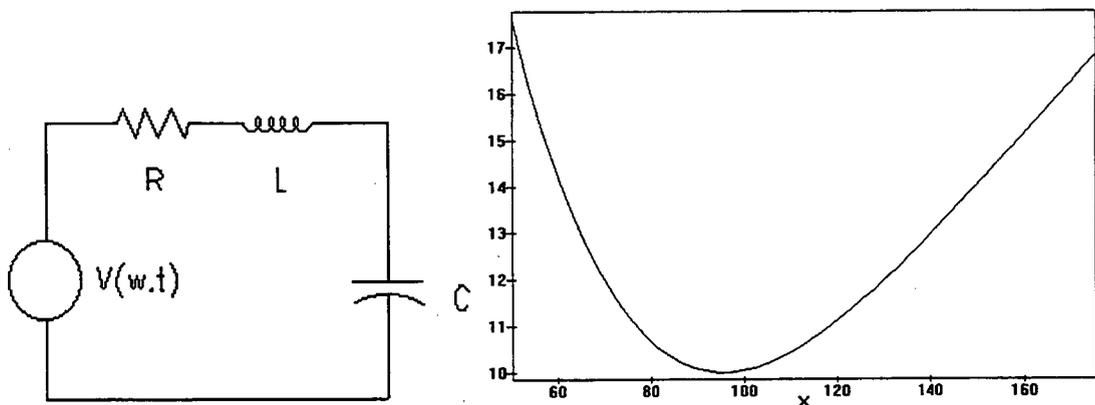


Figura 13 -(a) Circuito elétrico , (b) Impedância vs. Frequência.

A figura 13 mostra o comportamento do módulo da impedância como função da frequência, para um circuito com $R = 10 \text{ ohms}$, $L = 0.11H$ e $C = 0.001 F$. Caso exista alguma componente harmônica da tensão nesta frequência, uma elevada corrente pode aparecer no circuito, pois quem limita a amplitude desta corrente é a resistência.

2.3.6.2. Ressonância Paralela

Este tipo de ressonância, mostrada no circuito da figura 14, possui frequência de ressonância dada pela equação (2.38). A variação do módulo da impedância é observada na figura 13, para os mesmos parâmetros especificados no caso anterior.

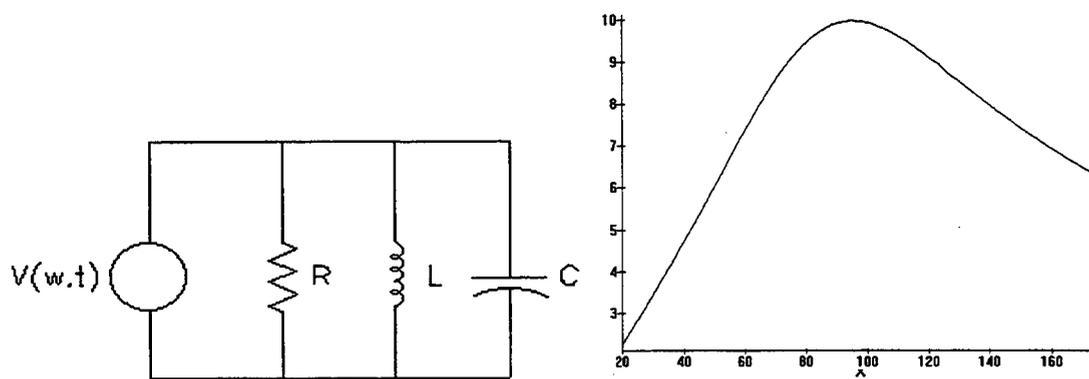


Figura 14 - (a) Circuito elétrico , (b) Impedância vs. Frequência

Na frequência de ressonância a impedância é alta, o que faz circular uma corrente baixa pela fonte. No entanto, uma alta corrente de circulação existirá entre o capacitor e indutor.

Como possíveis conseqüências destes casos, pode-se citar a excessiva atuação dos dispositivos de proteção dos bancos de capacitores, ou sua falha por danificação, proveniente de curto-circuito oriundo do rompimento do dielétrico.

2.3.7. Sistemas de Comunicação

A percepção de harmônicas circulando nos sistemas elétricos de potência foi primeiro detectada pelos sistemas de comunicação, quando as linhas telefônicas que partilhavam o mesmo caminho das linhas do sistema C.A., sofreram fortes níveis de ruídos. Estes ruídos se situavam na faixa de frequência compreendida entre 300 e 3300 Hz, e causavam interrupção dos sinais com acentuada frequência. Este fenômeno ocorreu, conforme referência [11], devido à instalação de uma unidade conversora, a qual passou a gerar harmônicos quando seus retificadores foram energizados. Desta forma, foram criados campos magnéticos e elétricos que induziram correntes no sistema telefônico, situadas na mesma faixa de frequência utilizada por estes. Concluiu-se portanto, que durante a operação de equipamentos com características não-lineares, há a possibilidade da indução de ruídos nos sistemas de comunicação devido à proximidade física entre estes circuitos e também pela amplitude das harmônicas.

2.4. Retificador Monofásico de Onda Completa em Ponte

Alimentando uma Carga RL

Com o objetivo de determinar a solução do Fluxo de Potência Harmônico, nesta seção apresenta-se a modelagem matemática de uma carga não-linear para inclusão nas equações da rede elétrica em regime permanente. As cargas estudadas neste trabalho são caracterizadas por formas de ondas periódicas, às quais se aplicam facilmente a decomposição em série de Fourier, apresentada na seção 2.1.2. Visa-se aqui o estudo das cargas alimentadas em corrente contínua, ligadas ao sistema CA por intermédio de retificadores. Para isto, é necessário fazer inicialmente uma análise matemática dos circuitos constituídos por diodos. Dentre estes, escolheu-se o circuito da ponte retificadora monofásica alimentando uma carga RL , para determinar a corrente drenada do lado CA que alimenta a ponte retificadora. Este modelo traduz o efeito da carga não-linear para o sistema de energia elétrica, de acordo com o que se deseja.

2.4.1. Funcionamento do Circuito

O circuito da figura 15 ilustra a representação em termos de circuito elétrico do retificador analisado.

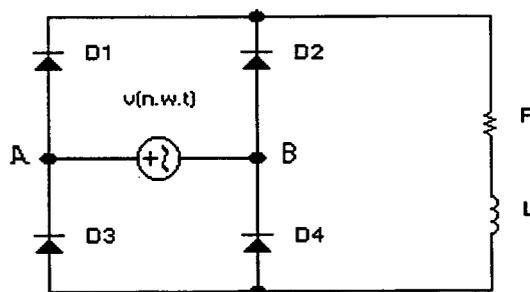


Figura. 15 - Circuito elétrico da ponte monofásica a diodo.

Os diodos são chaves eletrônicas que possuem dois estados: conduzindo (chave fechada), ou bloqueados (chave aberta). Estes estados são alcançados de acordo com a polarização à qual os mesmos são submetidos. A figura 16 ilustra o princípio de funcionamento destes elementos.

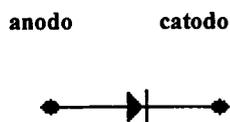


Figura . 16 - diodo semicondutor ideal

O diodo é dito ideal quando para uma tensão positiva aplicada nos terminais (anodo-catodo) ele apresenta resistência nula. Ou seja, a corrente é conduzida sem nenhuma perda de energia. Para uma tensão negativa aplicada nos seus terminais (anodo-catodo) ele apresenta resistência infinita, podendo bloquear uma tensão infinita.

A estrutura do retificador monofásico de onda completa em ponte, representada na figura 16, apresenta a seguinte seqüência de funcionamento quando uma tensão senoidal é aplicada aos seus terminais A-B:

- Durante o primeiro meio ciclo da onda de tensão de entrada, os diodos $D1$ e $D4$ conduzem, enquanto $D2$ e $D3$ encontram-se bloqueados. A corrente na carga, que circula no sentido de $D1$ para $D4$, entra pelo nó superior que conecta a resistência à estrutura retificadora;
- Durante o segundo meio ciclo da onda da tensão da entrada, os diodos $D2$ e $D3$ são os que desta feita conduzem, enquanto que $D1$ e $D4$ encontram-se bloqueados, e a corrente na carga mantém o sentido de circulação.

A forma de onda da tensão na carga é apresentada na figura 17. Observa-se que esta forma de onda corresponde à função analítica módulo de seno, com o dobro da freqüência da tensão do lado CA.

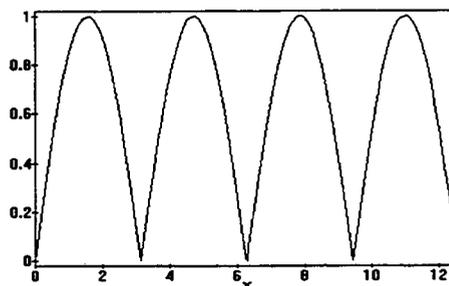


Figura 16. Forma de onda da tensão na carga.

A forma correspondente à corrente na carga, desde o momento de energização até o regime permanente, é apresentada na figura 18. Nesta figura, nota-se que a corrente é contínua em regime permanente, apresentando uma ondulação (“ripple”), que pode ser atenuada, conforme será visto subseqüentemente, aumentando-se o valor da indutância de alisamento (L) do circuito da figura 15.

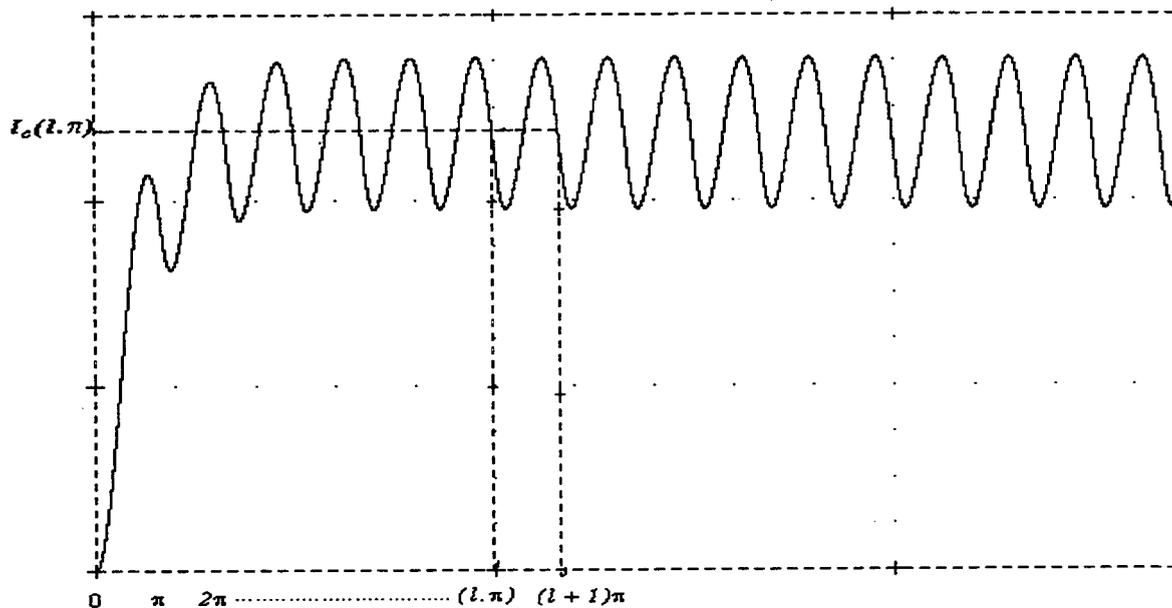


Figura 18 - Evolução transitória da corrente na carga do retificador.

2.4.2. Generalizações

Seja uma fonte genérica de alimentação, cuja expressão analítica seja

$$v(n \times \omega \times t) = V_n \times \sin(n \times \omega \times t + b) \quad (2.39)$$

aplicada a um retificador monofásico de onda completa para uma carga RL . A corrente na carga é expressa por

$$I_c(n \times \omega \times t) = A \times \sin(n \times \omega \times t + b - \alpha) + k \times e^{-\frac{(n \times \omega \times t + b)}{n \times \omega \times \tau}} \quad (2.40)$$

onde, A é a amplitude da tensão da fonte dividida pelo módulo de $Z(n, \omega)$; n é a ordem da harmônica (n é um n° inteiro); ω é a freqüência angular da componente fundamental

(velocidade angular síncrona, a qual para sistemas de 60hz é $\omega \cong 377 \text{ rad/seg.}$); b é a fase da tensão da entrada; alz é o ângulo da impedância de carga na frequência ($n.\omega$); τ é a constante de tempo do circuito RL , expressa como

$$\tau \equiv L/R \quad (2.41)$$

a constante k , a qual depende das condições iniciais, em regime permanente é obtida iterativamente até que:

$$\begin{aligned} I_c(l.\pi) &= I_c((l+1).\pi) \\ k &= I_c(l \times \pi) + A \times \sin(alz) \end{aligned} \quad (2.42)$$

onde, $I_c(l \times \pi)$ é a corrente em regime permanente no instante $l \times \pi$ (convergida); e l é um múltiplo inteiro do período (π).

$$A = V_n \div |Z(n.\omega)| \quad (2.43)$$

2.4.3. Determinação de k em Regime Permanente

Ao se aplicar a forma de onda da figura 17 na carga RL da figura 15 com condições iniciais nulas, a corrente na mesma evolui até seu estado em regime permanente, quando a condição $I_c(l.\pi) = I_c((l+1).\pi)$ é atingida (ver figura 18). Assim, para uma tensão de alimentação senoidal de amplitude V_n com fase b , e frequência $n.f_o$ aplicada aos terminais do retificador da figura.16, aparece na carga uma corrente que tem a expressão analítica da equação (2.40). Nesta expressão, as constantes são obtidas pelas equações (2.41), (2.42) e (2.43). A impedância da carga é calculada convencionalmente através das expressões

$$|Z(n.\omega)| = \sqrt{R^2 + (n.\omega.L)^2} \quad (2.44)$$

$$alz = \text{arctg}\left(\frac{n.\omega.L}{R}\right) \text{ (rad)} \quad (2.45)$$

$$\omega = 2.\pi.f_o \text{ (rad/seg.)} \quad (2.46)$$

As seguintes constantes são obtidas pelas condições iniciais e finais em cada intervalo de condução:

$$C_1 = A \cdot \sin(alz)$$

$$C_2 = A \cdot \sin(\pi - alz)$$

$$C_3 = e^{-\pi/n \cdot \omega \cdot \tau}$$

A constante k é calculada segundo o seguinte processo iterativo:

```

I(1) = 0.0
Do. j = 1.,20
...k = I(j) + C1
...I(j+1) = C2 + k.C3
...erro = Dabs(I(j+1) - I(j))
.....If.(erro ≤ toler)then
.....j = 20.....> (k.convergio)
.....End.If
End.Do
    
```

Quando o processo converge, a forma de onda é periódica, de período π rad, e a corrente terá igual valor nos limites extremos do período $I_c(l \cdot \pi) = I_c((l+1) \cdot \pi)$. Assim

$$I(j) = I(j+1) \tag{2.47}$$

$$I(j+1) = A \cdot \sin(\pi - alz) + k \cdot \exp(-\pi / n \cdot \omega \cdot \tau) \tag{2.48}$$

$$k = I(j) + A \cdot \sin(alz) \tag{2.49}$$

Substituindo as relações (2.47) e (2.48) na expressão (2.49) obtém-se

$$k = \frac{2 \times A \cdot \sin(alz)}{1 - e^{-\frac{\pi}{n \cdot \omega \cdot \tau}}} = \frac{2 \times \left(\frac{V_n}{Z(n \cdot \omega)} \right) \cdot \sin(alz)}{1 - e^{-\frac{\pi}{n \cdot \omega \cdot \tau}}} \tag{2.50}$$

$$I(l \cdot \pi) = \frac{A \cdot \sin(alz) \times (1 + e^{-\frac{\pi}{n \cdot \omega \cdot \tau}})}{1 - e^{-\frac{\pi}{n \cdot \omega \cdot \tau}}} \tag{2.51}$$

Estas expressões possibilitam a eliminação do processo iterativo descrito anteriormente, proporcionando um razoável ganho de velocidade no processo computacional. Estas simplificações porém, são decorrentes de observações do processo dinâmico da evolução da corrente na carga da estrutura retificadora. Todo o desenvolvimento descrito, foi necessário para viabilizar tais simplificações.

2.4.4. Determinação da Corrente na Linha

Uma vez determinadas todas as constantes da expressão analítica que descrevem a corrente periódica na carga (I_c), calcula-se a corrente na linha (I_l), a qual tem a seguinte característica:

$$I_l(n.\omega.t) = \begin{cases} I_c(n.\omega.t) \Rightarrow \text{para} \Rightarrow \frac{b}{n} \leq \omega.t \leq \frac{(\pi-b)}{n} \\ e \\ -I_c(n.\omega.t - \pi) \Rightarrow \text{para} \Rightarrow \frac{(\pi-b)}{n} \leq \omega.t \leq \frac{(2.\pi-b)}{n} \end{cases} \quad (2.52)$$

A análise gráfica desta equação, com o auxílio da figura 19, permite observar que a corrente é uma função alternada e periódica, de período ($2.\pi / n$), e sem termo médio. O índice n que aparece dividindo o período é devido ao fato que a frequência das tensões harmônicas são múltiplas inteiras positivas da fundamental.

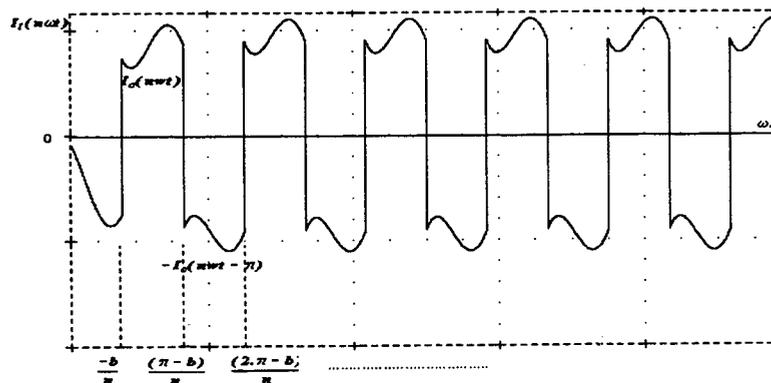


Figura 19 - Forma de onda da corrente alternada drenada da rede elétrica pelo retificador da figura 15.

Desde que as tensões no sistema são senoidais, para se fazer um estudo do fluxo de potência deve-se decompor a corrente na linha (composta por um termo senoidal somado a outro exponencial), em série trigonométrica de Fourier, calculando para tanto os coeficientes da mesma. Este procedimento torna possível calcular as potências, já que com

estas transformações a corrente na linha será também senoidal.

Substituindo $f(x)$ por $I_l(n.w.t)$, as integrais de (2.4) a (2.5) para esta expressão da corrente se tornam

$$a_0 = 0.0 \quad (2.53)$$

Lembrando que a função corrente (2.52) é definida por duas sentenças, válidas apenas nos seus subintervalos, a integração fica dividida também em dois intervalos dentro do período, isto é

$$b_m = \left(\frac{n}{\pi}\right) \cdot \left\{ \int_{-b/n}^{(\pi-b/n)} \left[A \cdot \sin(n \cdot x + b - \alpha) + k \cdot e^{-\frac{(n \cdot x + b)}{n \cdot \omega \cdot \tau}} \right] \cdot \sin(n \cdot m \cdot x) \cdot dx \right\} -$$

$$-\left(\frac{n}{\pi}\right) \cdot \left\{ \int_{(\pi-b/n)}^{(2\pi-b/n)} \left[A \cdot \sin(n \cdot x - \pi + b - \alpha) + k \cdot e^{-\frac{(n \cdot x - \pi + b)}{n \cdot \omega \cdot \tau}} \right] \cdot \sin(n \cdot m \cdot x) \cdot dx \right\} \quad (2.54)$$

e

$$a_m = \left(\frac{n}{\pi}\right) \cdot \left\{ \int_{-b/n}^{(\pi-b/n)} \left[A \cdot \sin(n \cdot x + b - \alpha) + k \cdot e^{-\frac{(n \cdot x + b)}{n \cdot \omega \cdot \tau}} \right] \cdot \cos(n \cdot m \cdot x) \cdot dx \right\} -$$

$$-\left(\frac{n}{\pi}\right) \cdot \left\{ \int_{(\pi-b/n)}^{(2\pi-b/n)} \left[A \cdot \sin(n \cdot x - \pi + b - \alpha) + k \cdot e^{-\frac{(n \cdot x - \pi + b)}{n \cdot \omega \cdot \tau}} \right] \cdot \cos(n \cdot m \cdot x) \cdot dx \right\} \quad (2.55)$$

Resolvendo-se as equações (2.54) e (2.55), substituindo os limites correspondentes e fazendo as simplificações trigonométricas convenientes, chega-se às seguintes expressões para o cálculo dos coeficientes série de Fourier através da análise do índice m :

1- Para m inteiro, positivo, ímpar e diferente da unidade (3, 5, 7, 9, 11,...), os coeficientes da série de Fourier podem ser calculados através das seguintes expressões:

$$a_m = (2.k.n.\omega.\tau.(1 + e^{-\pi/n.w.\tau})). \left[\frac{\cos(m.b) + m.n.\omega.\tau.\sin(m.b)}{\pi.(1 + (m.n.\omega.\tau)^2)} \right] \quad (2.56)$$

e

$$b_m = (2.k.n.\omega.\tau.(1 + e^{-\pi/n.w.\tau})). \left[\frac{-\sin(m.b) + m.n.\omega.\tau.\cos(m.b)}{\pi.(1 + (m.n.\omega.\tau)^2)} \right] \quad (2.57)$$

2- Para m igual à unidade:

$$a_1 = A.[\sin(b).\cos(alz) - \cos(b).\sin(alz)] + (2.k.n.\omega.\tau.(1 + e^{-\pi/n.w.\tau})). \left[\frac{\cos(b) + n.\omega.\tau.\sin(b)}{\pi.(1 + (n.\omega.\tau)^2)} \right] \quad (2.58)$$

e

$$b_1 = A.[\cos(b).\cos(alz) + \sin(b).\sin(alz)] + (2.k.n.\omega.\tau.(1 + e^{-\pi/n.w.\tau})). \left[\frac{n.\omega.\tau.\cos(b) - \sin(b)}{\pi.(1 + (n.\omega.\tau)^2)} \right] \quad (2.59)$$

3- Para m inteiro, positivo e par, todos os coeficientes da série são nulos.

No caso da análise da rede elétrica, estas expressões dependem das variáveis envolvidas no sistema de potência. Ou seja, do módulo das tensões e de seus respectivos ângulos, além da frequência de alimentação, do módulo e da fase da impedância de carga (carga não-linear), e da sua constante de tempo, sendo que estas quatro últimas permanecem inalteradas durante todo processo iterativo.

A corrente na linha apresenta a seguinte série de Fourier:

$$I_L(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cdot \cos(m.n.x) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \cdot \sin(m.n.x) \right\} \quad (2.60)$$

onde n indica a existência de tensões harmônicas na entrada do retificador. Ressalte-se que se for aplicado o princípio da superposição verifica-se que existe um acoplamento de algumas ordens de tensões harmônicas mais a fundamental nas harmônicas da corrente de linha. Por exemplo, para as seguintes ordens harmônicas (m) de corrente, tem-se a seguinte soma de coeficientes (agrupamentos):

$$\begin{aligned} \mathbf{m} = 5 \quad a_{5,T} &= a_{5,1} + a_{5,5} & \mathbf{e} \quad b_{5,T} &= b_{5,1} + b_{5,5} \\ \mathbf{m} = 3 \quad a_{3,T} &= a_{3,1} + a_{3,3} & \mathbf{e} \quad b_{3,T} &= b_{3,1} + b_{3,3} \\ \mathbf{m} = 9 \quad a_{9,T} &= a_{9,1} + a_{9,3} + a_{9,9} & \mathbf{e} \quad b_{9,T} &= b_{9,1} + b_{9,3} + b_{9,9} \end{aligned}$$

e assim por diante.

Após a soma de todos os coeficientes dos senos e cosenos de mesma frequência da corrente gerados por diferentes tensões harmônicas, pode-se agora compor os senos e cosenos (forma retangular da série de Fourier), também de mesma frequência em seno e coseno únicos, conforme foi apresentado na seção II.1.1.2. Desta forma obtém-se o módulo e o argumento da corrente na linha para cada frequência .

Se for feita uma composição em seno, a forma retangular para o fasor corrente, para uma dada harmônica, é expressa por

$$\dot{I}_l(n) = b_n + j \cdot a_n \quad (2.61)$$

Visando ilustrar com mais detalhes o desenvolvimento realizado neste trabalho, um exemplo numérico com o circuito estudado nesta seção é apresentado no Apêndice 1. Nele são mostradas as formas de ondas de corrente na carga RL no lado de corrente contínua, e a corrente resultante no lado de corrente alternada. Também foram feitas variações nos parâmetros R e L da carga não-linear e o cálculo das potências em cada situação, e plotadas as formas de onda das correntes que surgiram em cada caso. As principais conclusões obtidas no final desta análise foram as seguintes:

1. O fator de potência medido pela forma convencional na frequência fundamental é maior que o real;
2. A potência aparente não é formada simplesmente pelos dois termos $P+jQ$, mas também por uma parcela que representa a potência de distorção harmônica D ;
3. As harmônicas tendem a baixar o fator de potência da carga;
4. Quando se aumenta a indutância de alisamento L da carga, consegue-se uma corrente com menos “ripple”, ou seja, quase que contínua. Isto porém, acarreta um aumento das correntes harmônicas na linha, ocasionando uma elevação na potência de distorção, com conseqüente diminuição do fator de potência da carga;
5. Quando se aumenta a carga, ou seja, quando se diminui R , um aumento nas amplitudes harmônicas da corrente na linha é constatado;
6. Observando a expressão trigonométrica da corrente fundamental na linha, nota-se que esta está atrasada fasorialmente com relação à tensão. Daí conclui-se que a carga está absorvendo potência reativa indutiva;
7. A potência ativa na linha tende à potência média na carga para L muito grande.

2.5. Conclusões

Diversos tipos de carga produzem distorção nas formas de onda de corrente e tensão, causando o aparecimento de ondas harmônicas das mais variadas frequências. Os efeitos das harmônicas nas redes de energia elétrica são os mais variados. Fundamentalmente, a distorção das ondas senoidais provoca a geração de um termo de distorção na potência aparente alterando o seu fator de potência. Ao invés do tradicional triângulo, passa-se a ter um tetraedro de potências, o qual inclui um termo de distorção. Isto resulta em problemas de medição, proteção e diminuição da vida útil dos equipamentos dentre outros prejuízos.

A análise da operação de sistemas elétricos de potência considerando cargas não-lineares implica no conhecimento das tensões e correntes complexas, nas frequências fundamental e harmônicas. Desde que estas grandezas são originalmente periódicas porém não senoidais, a aplicação dos conceitos tradicionais de fasores requer uma reformulação analítica das equações que representam essas cargas. Isto pode ser feito utilizando-se a decomposição em Série de Fourier. Esta decomposição e o Princípio da Superposição são

uma forma de viabilizar a aplicação dos métodos convencionais de cálculo dos fluxos de potência nas redes de energia elétrica, conforme será mostrado no capítulo subsequente.

3. Estudo do Fluxo de Potência Considerando Cargas Não-Lineares

Desde a sua proposição, os métodos iterativos utilizados na determinação da solução das equações não-lineares da rede elétrica (Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Desacoplados, Somas das Injeções de Corrente e Soma das Injeções de Potência) têm sido utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para a análise do sistema de potência tanto, no nível de transmissão como no nível de distribuição. A formulação desses métodos é baseada em formas de ondas senoidais de corrente e tensão, com a mesma frequência dos geradores do sistema de potência. Por este motivo, estes métodos na sua forma original não devem ser utilizados na análise de redes elétricas contendo cargas que distorçam as formas de ondas das correntes e tensões do sistema. Neste trabalho são utilizados os métodos da Somas das Correntes e de Newton-Raphson como algoritmos básicos de solução do Fluxo de Potência Harmônico. O objetivo é incluir a modelagem das cargas não-lineares nas equações do sistema de potência, e resolver as mesmas para obter as tensões nas frequências fundamental e as harmônicas em todas as barras do sistema. Isto possibilita uma avaliação mais precisa dos despachos de potência nos geradores e das distorções na forma de onda das tensões ao longo do sistema. Para atingir este objetivo, alterações nos métodos convencionais no sentido de considerar o efeito da carga não-linear são propostas.

Apresenta-se ainda neste capítulo, a modelagem dos componentes do sistema de potência (cargas lineares, transformadores, linhas de transmissão, geradores e compensadores). Desde que considerou-se neste trabalho uma operação da rede elétrica trifásica sob condições de operação equilibrada, no cálculo iterativo utilizou-se a representação de apenas uma fase da rede elétrica (seqüência positiva), o que tornou mais simples a aplicação dos algoritmos.

3.1. Dinâmica das Harmônicas na Rede Elétrica

Seja o sistema mostrado na figura 20, com n barras, NG geradores, NCL barras de cargas lineares e $NCNL$ barras de cargas não-lineares.

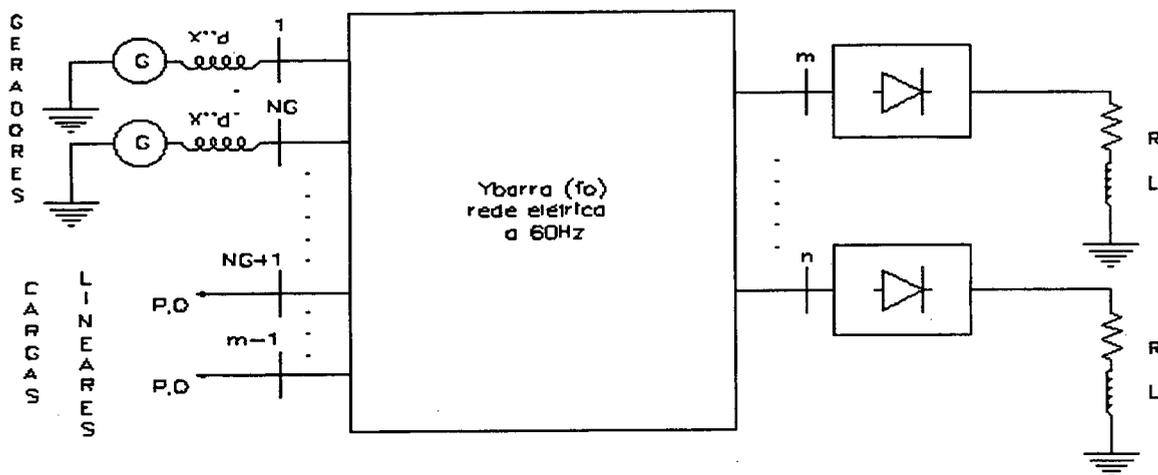


FIGURA 20 - Sistema com n barras na frequência fundamental (f_0).

Quando as barras m a n (portando as cargas não-lineares) são energizadas, além da tensão senoidal pura dos geradores surgirão correntes harmônicas. Estas circularão pela rede elétrica produzindo tensões harmônicas em todas as barras do sistema. Até que um ponto de operação seja atingido, tanto as tensões harmônicas como a componente fundamental são modificadas como resultado das correntes harmônicas geradas pelas cargas não-lineares. Assumindo que a rede elétrica é linear e passiva, é possível aplicar o Princípio da Superposição, de forma que cada harmônica seja considerada independentemente. Assim, as equações da rede elétrica devem ser representadas na forma de matrizes admitância (Y-barra) calculadas em cada frequência. Para isto, os valores de admitância correspondentes aos modelos dos geradores e das cargas lineares são adicionados ao elemento diagonal do nó que contém estes elementos na matriz admitância de barra. As Forças Eletromotrizes (FEM) dos geradores são consideradas nulas nas frequências harmônicas, e suas reatâncias subtransitórias aparecem ligadas a terra na sua representação nas frequências harmônicas. As cargas lineares, as quais são frequentemente especificadas por suas injeções constantes de potências ativa e reativa, são representadas por impedâncias, conforme sugerido na seção 3.2. Os parâmetros da linha também devem ser corrigidos em cada frequência, antes da determinação da matriz admitância de barra e das equações do fluxo de potência, como indicado na seção subsequente. As cargas não-lineares por sua vez, são representadas como fontes de correntes, da maneira proposta na referência [8]. Estas considerações permitem que o sistema da figura 20 seja redesenhado para cada harmônica, como é mostrado na figura 21.

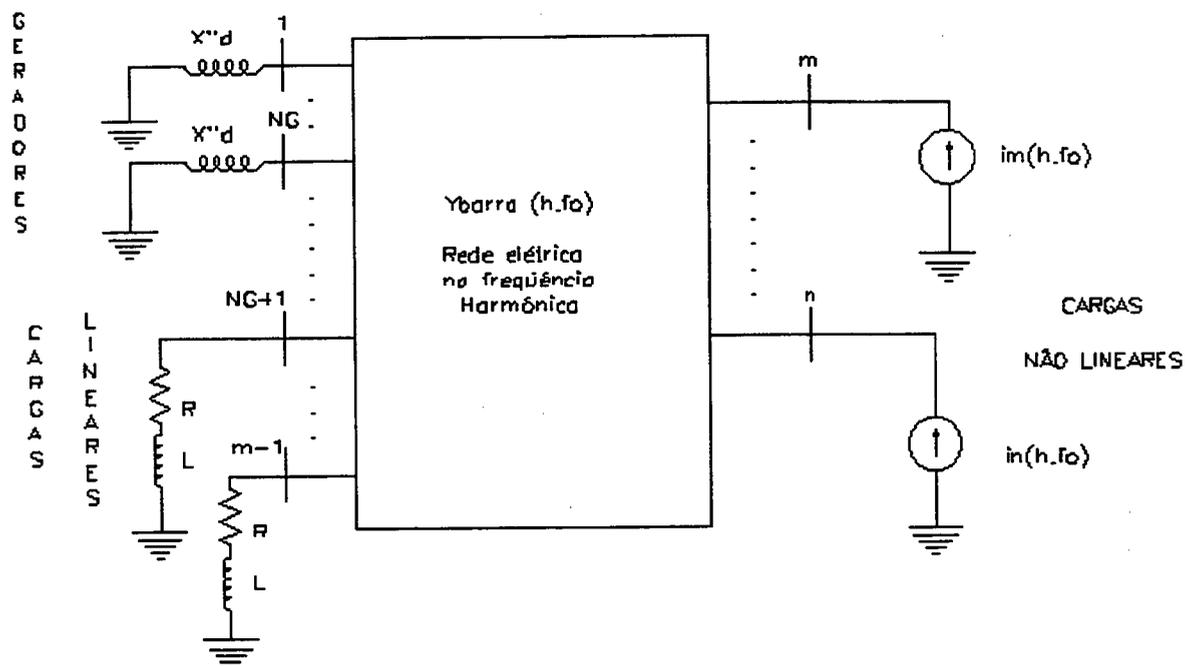


Figura 21 - Sistema com n barras na frequência harmônica ($f = h \cdot f_0$).

A injeção de corrente na barra portadora de carga linear é determinada em cada frequência e somada às correntes que fluem desta em direção às barras adjacentes. A figura 22 ilustra o exposto.

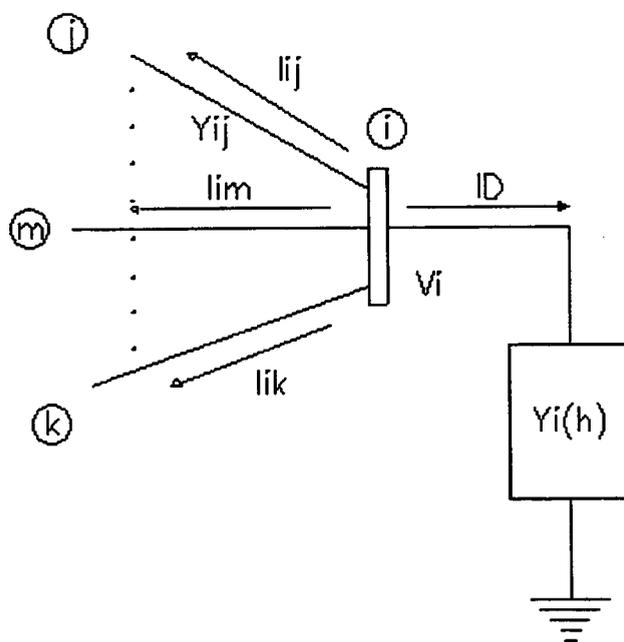


Figura 22 - Injeção de corrente em uma barra de carga linear.

Segundo a lei dos nós de Kirchoff:

$$\sum_{j=j}^k \dot{I}_{ij} = \dot{I}_{G_i} - \dot{I}_{D_i} \quad (3.1)$$

onde, \dot{I}_{ij} é o fasor corrente que flui do nó i para o nó j , devido à diferença de tensão entre estes dois nós; \dot{I}_{G_i} é o fasor corrente entregue pelo gerador conectado ao nó i para o sistema; e \dot{I}_{D_i} é o fasor corrente drenado pela carga conectada ao nó i .

Para as barras de carga (barras do tipo PQ) a injeção de corrente do gerador é nula, isto é $\dot{I}_{G_i} = 0$, e

$$\dot{I}_{D_i} = Y_i(h) \times V_i(h) \quad (3.2)$$

Assim, a equação (III-1) pode ser rescrita como

$$y_{ij}(h) \times V_i(h) - \sum V_j(h) \times y_{ij}(h) = -Y_i(h) \times V_i(h) \quad (3.3)$$

$$\left(\sum_{j=j}^k y_{ij}(h) + Y_i(h) \right) \times V_i(h) + \left(\sum_{j=j}^k [-y_{ij}(h)] \times V_j(h) \right) = 0 \quad (3.4)$$

Da equação (3.4) pode-se definir os seguintes elementos da matriz admitância de barra do sistema:

- Elementos diagonais:

$$\dot{Y}_{ii} = \left(\sum_{j=j}^k y_{ij}(h) + Y_i(h) \right) \quad (3.5)$$

- Elementos não diagonais:

$$\dot{Y}_{ij} = -y_{ij} \quad (3.6)$$

Separando da expressão (3.4) suas partes real e imaginária obtém-se:

$$I_{i, re}(h) = V_{i(h)} \times [G_{ii}(h) \times \cos(\theta_{i(h)}) - B_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_{i(h)})] + \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \cos(\theta_{j(h)}) - B_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_{j(h)})] \quad (3.7)$$

$$I_{i, im}(h) = V_i(h) \times [G_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_{i(h)}) + B_{ii}(h) \times \cos(\theta_{i(h)})] + \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_{j(h)}) + B_{ij}(h) \times \cos(\theta_{j(h)})] \quad (3.8)$$

A determinação da injeção de corrente para as cargas não-lineares é feita de maneira análoga àquela relativa à carga linear. Porém, a equação de balanço de corrente, pela lei de Kirchoff aplicada ao esquema da figura 23 resulta na equação

$$\dot{g}_i(h) + \sum I_{ij}(h) = 0 \quad (3.9)$$

onde $\dot{g}_i(h)$ é o fasor corrente na carga não-linear, determinado pelos coeficientes da série de Fourier para uma dada frequência, isto é

$$g_i(h) = b_i(h) + j.a_i(h) \quad (3.10)$$

e h é um inteiro ímpar (1, 3, 5, 7...).

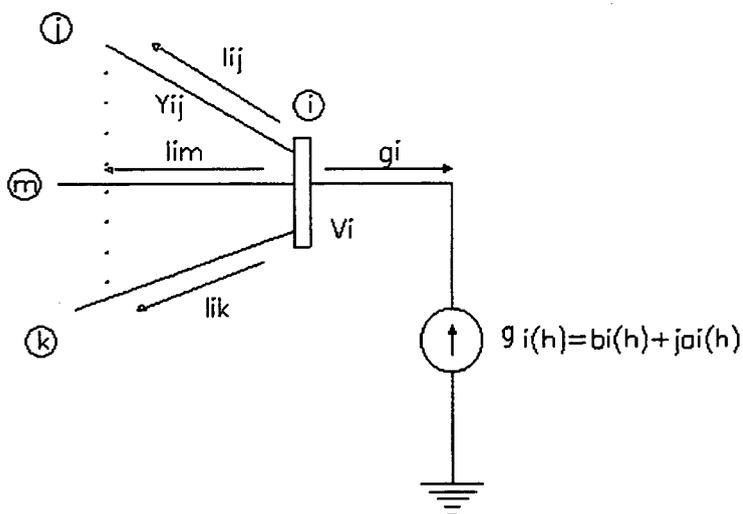


Figura 23 - Balanço de corrente em uma barra de carga não-linear.

Separando na expressão (2.9) as partes real e imaginária obtém-se:

$$I_i \text{re}(h) = b_i(h) + V_{i(h)} \times [G_{ii}(h) \times \cos(\theta_{i(h)}) - B_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_{i(h)})] + \sum V_{j(h)} \times [G_{ij}(h) \times \cos(\theta_{j(h)}) - B_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_{j(h)})] \quad (3.11)$$

$$I_i \text{im}(h) = a_i(h) + V_i(h) \times [G_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_i(h)) + B_{ii}(h) \times \cos(\theta_i(h))] + \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_j(h)) + B_{ij}(h) \times \cos(\theta_j(h))] \quad (3.12)$$

As expressões (3.7) e (3.8), da mesma forma que as equações (3.11) e (3.12), são as equações de balanço de corrente a serem resolvidas com o auxílio dos métodos iterativos de solução de equações não-lineares considerando harmônicas. Estas equações em regime permanente são nulas.

Uma vez conhecidas as injeções de correntes harmônicas nas barras de cargas não-lineares, as tensões harmônicas podem ser determinadas pela solução do sistema linear complexo indicado abaixo:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ g_m \\ g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11(h)} & Y_{12(h)} & \cdot & Y_{1m(h)} & Y_{1n(h)} \\ Y_{21(h)} & Y_{22(h)} & \cdot & Y_{2m(h)} & Y_{2n(h)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{m1(h)} & Y_{m2(h)} & \cdot & Y_{mm(h)} & Y_{mn(h)} \\ Y_{n1(h)} & Y_{n2(h)} & \cdot & Y_{nm(h)} & Y_{nn(h)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1(h) \\ V_2(h) \\ \cdot \\ V_m(h) \\ V_n(h) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Utilizando as relações :

$$Y_{ij(h)} = G_{ij(h)} + jB_{ij(h)} \quad (3.14)$$

$$V_i(h) = V_i \text{Re}(h) + jV_i \text{Im}(h) \quad (3.15)$$

$$g_i(h) = b_i(h) + j.a_i(h) \quad (3.16)$$

o sistema de equações complexas pode ser reescrito como um sistema linear real da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{Re} \\ \bar{I}_{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_{Re} \\ \bar{V}_{Im} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

O módulo da tensão é dado por

$$|V| = \sqrt{V_{Re}^2 + V_{Im}^2} \quad (3.18)$$

e o seu argumento é calculado como

$$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{V_{Im}}{V_{Re}} \right) \quad (3.19)$$

3.2. Modelagem dos Componentes do Sistema no Domínio da Frequência

Durante a operação em regime permanente, as correntes harmônicas que circulam pela rede de corrente alternada são consideradas geradas por fontes de correntes ideais (relativas às cargas não-lineares). O sistema inteiro pode ser modelado a partir de impedâncias (elementos passivos), nas quais essas fontes de correntes são injetadas.

As impedâncias representam os elementos da rede elétrica e devem ser modificadas para cada frequência harmônica. A cada vez que esta tarefa é realizada, elas devem ser incorporadas à matriz de impedâncias de barra (Z_{barra}), também calculada em cada frequência harmônica.

Conhecendo-se as barras geradoras de correntes harmônicas assim como a sua natureza (amplitude e fase), e injetando as mesmas nos referidos nós, é possível determinar as tensões harmônicas em todas as barras, e subsequentemente calcular todas as grandezas envolvidas na análise harmônica (potências, valores eficazes e distorções), conforme sugere Mahmoud [1]. Para viabilizar esta metodologia, o modelo dependente da frequência para cada elemento ligado ao sistema deve ser utilizado. As próximas seções descrevem os modelos matemáticos dos componentes do sistema de potência usados neste tipo de estudo.

3.2.1. Linha de transmissão

As linhas de transmissão têm papel importante na resposta harmônica do sistemas, pois nelas podem ocorrer fenômenos que atenuam ou amplificam as correntes harmônicas. Estes fenômenos estão associados às ressonâncias série ou paralela, devido à compensação de reativos oriundos de bancos capacitivos colocados em certas barras de cargas, e também a outros elementos ligados ao sistema. Por exemplo, outra fonte de complexidade na análise harmônica é o aumento da resistência da linha com a frequência. Este aumento acarretará um acréscimo nas perdas e um maior aquecimento dos condutores, durante a transmissão da corrente contendo conteúdo harmônico. É portanto necessário, modelar adequadamente todos os elementos distribuídos das linhas de transmissão, para avaliar precisamente a sua variação com a frequência e a sua influência no fluxo de potência da rede.

As linhas de transmissão são representadas pelo modelo de linha longa, com a modificação para frequência harmônica. O modelo *PI-nominal* usado, é determinado pelas formulas hiperbólicas, conforme mostrado na referência [26], com os seus parâmetros dados por

$$\begin{aligned} Z_{\pi} &= Z \left(\frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \right) \\ Y_{\pi} / 2 &= \left(\frac{\gamma l}{Z} \right) \times \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

onde, $\gamma = \sqrt{z \times Y}$; $Z = z \times l$; l é o comprimento da linha de transmissão; z é a impedância série da linha por unidade de comprimento; e Y é a admitância paralela da linha por unidade de comprimento.

A mudança dos parâmetros do condutor, isto é, da resistência e da indutância interna, devido à não uniforme distribuição da corrente dentro deste, é conhecido na literatura como efeito “*skin*” ou pelicular. Ou seja, a corrente tende a fluir pela superfície do condutor à medida que a frequência aumenta. A consequência deste efeito é um aumento da resistência do condutor e uma diminuição da sua indutância interna [3].

A referência [27] apresenta um método para determinação da resistência AC e da indutância interna de um condutor com seção transversal circular em função da resistência DC do condutor.

O aumento da frequência faz com que o efeito pelicular seja dominante na resistência. Este efeito pode ser interpretado com o auxílio da equação (III-22), obtida da referência [29], para a determinação da profundidade de penetração do campo magnético no interior de um material que possui uma permeabilidade magnética μ e uma resistividade elétrica ρ . Na frequência f esta profundidade de penetração é dada por

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times f \times \mu}} \quad (3.22)$$

A corrente contínua, ao percorrer um condutor, encontra no mesmo a seguinte resistência por unidade de comprimento:

$$\frac{R_0}{\ell} = \frac{\rho}{A} \quad (3.23)$$

onde, R_0 é a resistência DC; ρ é a resistividade elétrica do condutor na temperatura t_x ; A é a área do condutor; t_x é a temperatura ambiente ou condição de serviço em $^{\circ}C$, e a área da seção transversal é dada por $A = \pi \times r^2$.

A resistividade do condutor varia com a temperatura, a qual por sua vez é dependente dos efeitos combinados de aquecimento provocados pelo clima e também pelo carregamento da linha.

Conhecendo-se a resistência de uma linha a uma dada temperatura t_1 , é possível determinar a resistência a uma temperatura t_2 usando a equação

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (3.24)$$

onde T é uma constante que depende do tipo de condutor metálico (igual a 228 para o alumínio e 241 para o cobre).

Supondo na figura 24, que a distribuição da corrente, devido à combinação das forças eletrostáticas e eletromagnéticas, encontra-se no anel de espessura d , uma nova resistência à passagem da corrente alternada de frequência f é sugerida. O valor desta resistência pode ser calculado a partir da razão entre a resistência AC e a resistência DC, a qual é inversamente proporcional às razões das áreas, conforme a expressão

$$\frac{R_{AC}}{R_0} = \frac{1.0}{\left(1 - \left(1 - \frac{d}{r}\right)^2\right)} \quad (3.25)$$

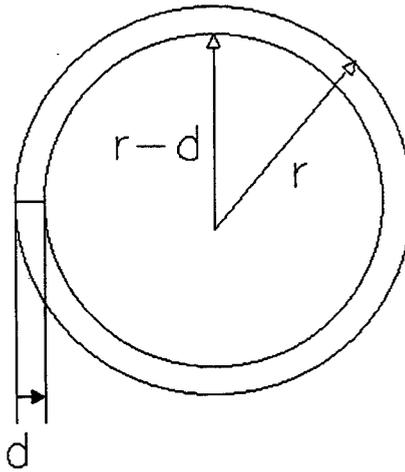


Figura 24. Seção de um condutor cilíndrico .

A equação (3.25) permite uma aproximação no cálculo da resistência à corrente alternada em função da frequência.

Uma formulação mais elaborada, para o cálculo efetivo da resistência e indutância interna dos condutores é aquele fornecido pela referência [27]. Em função da frequência elas são dadas respectivamente por

$$\frac{R_{ac}}{R_0} = \frac{mr}{2} \times \left(\frac{ber(mr) \times bei'(mr) - bei(mr) \times ber'(mr)}{(ber'(mr))^2 + (bei'(mr))^2} \right) \quad (3.26)$$

e

$$\alpha L = \frac{L_i}{L_{i0}} = \frac{4}{mr} \times \left(\frac{ber(mr) \times ber'(mr) + bei(mr) \times bei'(mr)}{(ber'(mr))^2 + (bei'(mr))^2} \right) \quad (3.27)$$

onde,

$m = \sqrt{\frac{\omega \times \mu}{\rho}}$; com $\omega = 2\pi f$; r é o raio geométrico do condutor [m]; ρ é a resistividade elétrica [ohm.m]; e μ é a permeabilidade magnética [H/m].

As funções $ber(mr)$ e $bei(mr)$ são abreviações de “Bessel real ” e “Bessel imaginário”. Estas funções são expressas pelas seguintes séries infinitas e alternadas:

$$ber(mr) = 1 - \frac{mr^4}{2^2 \times 4^2} + \frac{mr^8}{2^2 \times 4^2 \times 6^2 \times 8^2} - \dots \quad (3.28)$$

$$bei(mr) = \frac{mr^2}{2^2} - \frac{mr^6}{2^2 \times 4^2 \times 6^2} + \frac{mr^{10}}{2^2 \times 4^2 \times 6^2 \times 8^2 \times 10^2} \dots \quad (3.29)$$

E as funções $ber'(mr)$ e $bei'(mr)$ são as derivadas primeiras das funções $ber(mr)$ e $bei(mr)$ respectivamente, com relação a mr .

A literatura também apresenta curvas da razão $\frac{R_{ac}}{R_0}$ em função de $\sqrt{\frac{f}{R_0}}$, o que sugere o relacionamento do produto mr com $\sqrt{\frac{f}{R_0}}$. Isto é obtido da forma descrita a seguir.

Sabe-se que $mr = r \times \sqrt{\frac{2\pi \cdot f \cdot \mu}{\rho}}$ e que a resistência à corrente contínua é

$$\frac{R_0}{l} = \rho / A .$$

Sendo $A = \pi \cdot r^2$, então $\sqrt{\frac{f}{R_0}} = \sqrt{\frac{f \cdot A}{\rho}}$.

Deste modo, a relação $mr/\sqrt{\frac{f}{R_0}}$ se transforma em

$$mr/\sqrt{\frac{f}{R_0}} = r \times \sqrt{\frac{2\pi \cdot f \cdot \mu}{\rho}} \times \frac{1.0}{\sqrt{f \cdot \pi \cdot r^2 / \rho}}, \text{ sendo } \mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}.$$

Tal que, a combinação dessas expressões conduz a

$$mr/\sqrt{\frac{f}{R_0}} = \sqrt{8\pi \cdot 10^{-7}} \quad (3.30)$$

de onde se observa que os argumentos mr e $\sqrt{\frac{f}{R_0}}$ estão relacionados por

$$mr = 1.58533 \times 10^{-3} \times \sqrt{f/R_0} \quad \text{para } R_0 \text{ em } [\Omega/m];$$

$$mr = 0.050132 \times \sqrt{f/R_0} \quad \text{para } R_0 \text{ em } [\Omega/Km];$$

$$mr = 0.0636 \times \sqrt{f/R_0} \quad \text{para } R_0 \text{ em } [\Omega/milha].$$

A indutância própria de um condutor é composta por uma indutância interna e uma indutância externa. A indutância interna é dependente da distribuição de corrente no condutor, e portanto da frequência. A indutância externa depende da geometria da linha e do condutor. Estas grandezas são definidas em [28] como

$$L_i = \mu \times l \times \alpha L / 8 \times \pi$$

e

$$L_e = \frac{\mu \times l}{2 \times \pi} \times \ln(D/r)$$

Supondo transposição entre as fases, a distância equivalente (média geométrica) entre os condutores é D e as equações estão expressas em (Henry /m).

A impedância de seqüência positiva por unidade de comprimento (metro) e por fase, conforme mostrado também na referência [28], é dependente da freqüência e dada por

$$Z_1 = R_{ac} + j \times \omega \times (L_i + L_e)$$

Considerando $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m],

$$L_i + L_e = 2 \times 10^{-7} \times (\ln(D/r) + \alpha L / 4)$$

$$L_i + L_e = 2 \times 10^{-7} \times (\ln(D/r) + \alpha L \times \ln e^{1/4})$$

$$L_i + L_e = 2 \times 10^{-7} \times (\ln(D/r) + \alpha L \times \ln 1/e^{-1/4})$$

$$L_i + L_e = 2 \times 10^{-7} \times [\ln(D/r) + \ln(1/(0.779)^{\alpha L})]$$

resultando em

$$Z_1 = R_{ac} + j \times \omega \times 2 \times 10^{-7} \times [1000 \times \ln(D/r) + \ln(1/(0.779)^{\alpha L})] \quad (3.31)$$

Esta expressão permite calcular a impedância da rede para todas as freqüências. Deve ser observado que quando se utiliza a fórmula (3.31) a resistência DC deve ser fornecida em ohm/Km/cond.

As figuras 25 e 26 mostram as variações dos fatores multiplicativos para a resistência efetiva e indutância interna de um condutor com a ordem harmônica, que apresenta $mr = 1$ a 60 Hz .

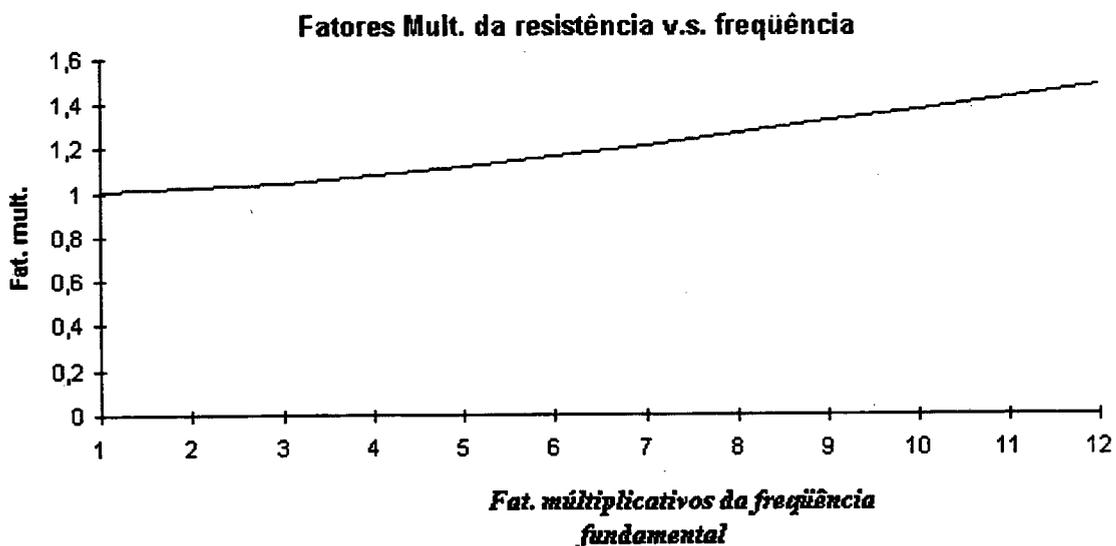


Figura 25- Razão R / Rdc com a freqüência.

FT. Li Vs. f [Hz]

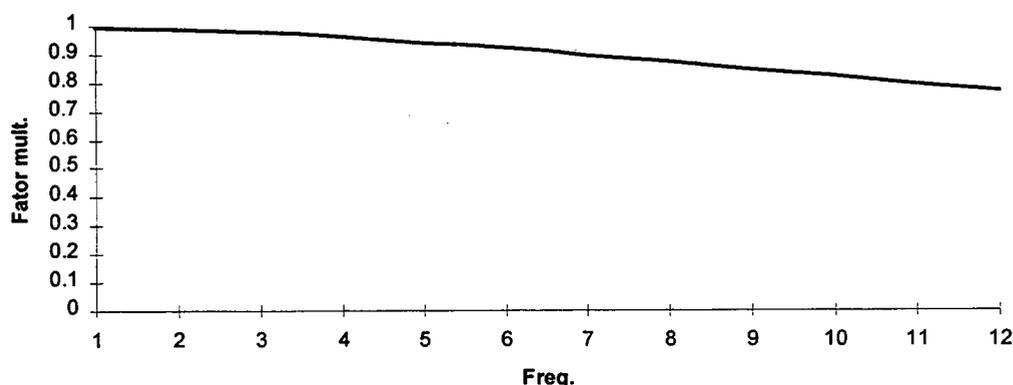


Figura 26- Fator multiplicativo da indutância interna.

Nos gráficos das figuras 25 e 26, os valores das abscissas são números inteiros múltiplos da frequência fundamental. Observando-se estes gráficos, conclui-se que enquanto a resistência efetiva aumenta, a indutância interna diminui. Este comportamento é predominante à medida que mr aumenta. Isto implica num aumento do raio do condutor, o que provoca um aumento na resistência efetiva do mesmo com a frequência.

A tabela 2 mostra as principais características elétricas para três cabos de cobre nus.

Bitolas	Raio médio geométrico	Resistência a 25°C		Resistência a 50°C		Reatância indutiva	Reatância capacitiva megohm	Corrente máxima admissível
		CC	60 Hz	CC	60 Hz			
MCM	a 60(Hz)	CC	60 Hz	CC	60 Hz	a (1m)	a(1m)	(A)
	(m)	ohm /Km/cond		ohm/Km/cond		60 Hz	60 Hz	60 Hz
1000	0.01122	0.03635	0.0394	0.0397	0.0425	0.338599	0.20174	1300
900	0.01064	0.04039	0.0431	0.0441	0.0467	0.342601	0.20423	1220
800	0.01003	0.04543	0.0479	0.0497	0.0520	0.37054	0.20709	1130
500	0.00780	0.08070	0.0822	0.0883	0.0896	0.369925	0.21845	840
250	0.00579	0.14540	0.1460	0.1591	0.1597	0.388397	0.23284	540
105.5	0.003392	0.34490	0.34490	0.3766	0.3772	0.428811	0.25618	310
16.51	0.00127	2.15660	2.15660	2.2361	2.2361	0.419030	0.30642	90

Tabela 2-Seções de condutores de cobre.

Nesta tabela, os valores da resistência e da reatância indutiva estão em *ohm/Km* e por condutor; e a reatância capacitiva é dada por *megohm por Km* de condutor. O afastamento entre condutores é de um metro. Pode-se observar nesta mesma tabela as variações da resistência com a frequência e temperatura, as quais podem ser comprovadas com o auxílio das equações apresentadas nesta seção.

Quando os efeitos da linha longa são ignorados, ou seja, no caso de linhas curtas (sistemas de distribuição) ou no caso de baixa ordem harmônica, os elementos componentes das matrizes *Zbarra* e *Ybarra* são calculados na forma convencional, conforme sugerido pela referência [8], ao invés de serem determinados através de formulas hiperbólicas.

No que segue, uma análise da variação dos parâmetros série das linhas de transmissão é apresentada. Supondo que os parâmetros de uma linha de transmissão sejam conhecidos, afim de determinar a sua impedância série, considera-se que

$$Z_{serie} = R_{ac} + jXl = R_{ac} + j \times 2\pi \cdot Lt \cdot f = R_{ac} + j \times K \cdot f$$

onde

$$K = 2\pi \cdot Lt .$$

Por outro lado, a admitância da linha de transmissão vale

$$Y_{serie} = G + j.B = \frac{R_{ac} - jK.f}{R_{ac}^2 + (K.f)^2}$$

ou

$$G = \frac{R_{ac}}{R_{ac}^2 + (K.f)^2}$$

e

$$B = -\frac{K.f}{R_{ac}^2 + (K.f)^2}$$

Com base nessas expressões, as seguintes assíntotas são determinadas:

$$G = 1/R_{ac} \text{ para } f \rightarrow 0$$

e

$$G = 0 \text{ para } f \rightarrow \infty$$

$$B = 0 \text{ tanto para } f \rightarrow \infty, \text{ como para } f \rightarrow 0$$

Os pontos de máximo são determinados derivando-se cada uma das expressões em relação a f , e igualando este resultado a zero. Isto fornece

$$G_{\max} = 1/R_{ac} \text{ para } f_{\max} = 0$$

e

$$B_{\max} = 1/2 \times R_{ac} \text{ quando } f_{\max} = R_{ac}/K$$

A figura 27 ilustra este estudo, para um caso onde L e R são feitos igual à unidade.

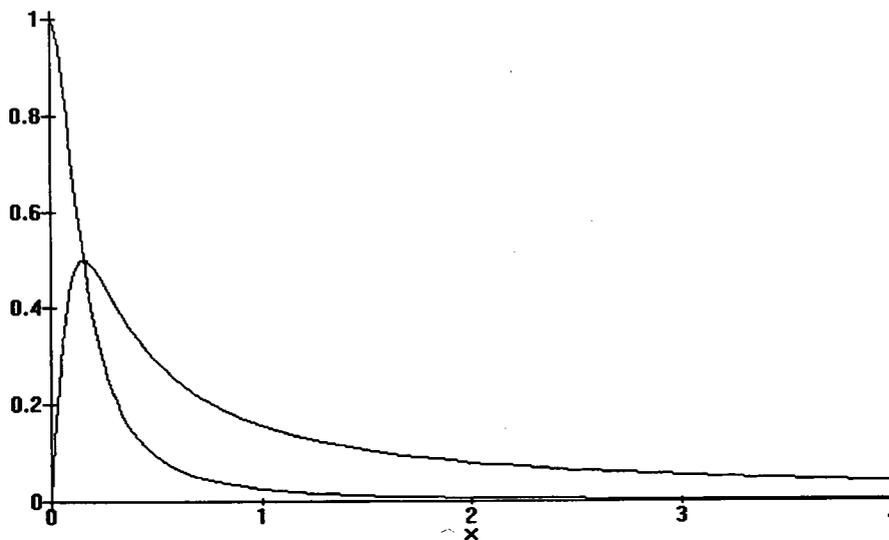


Figura 27 - Variação da condutância e da susceptância da linha com a frequência.

Na figura 27 a curva que inicia em “1” é a curva da condutância série da linha, e a curva que inicia em “0” é a da susceptância série da linha, para um caso onde a resistência e indutância são iguais à unidade.

Um efeito interessante é que, para alguns sistemas de distribuição, onde a resistência efetiva da linha em 60 Hz é maior que a reatância indutiva da mesma, ocorre um crescimento inicial da susceptância indutiva da linha até uma frequência maior que a fundamental. Isto

pode ocasionar um aumento das tensões harmônicas com o aumento da frequência. O gráfico da figura 28 foi plotado com os dados do condutor *MCM 16.51*, obtidos da tabela, na qual pode-se facilmente observar tal fenômeno.

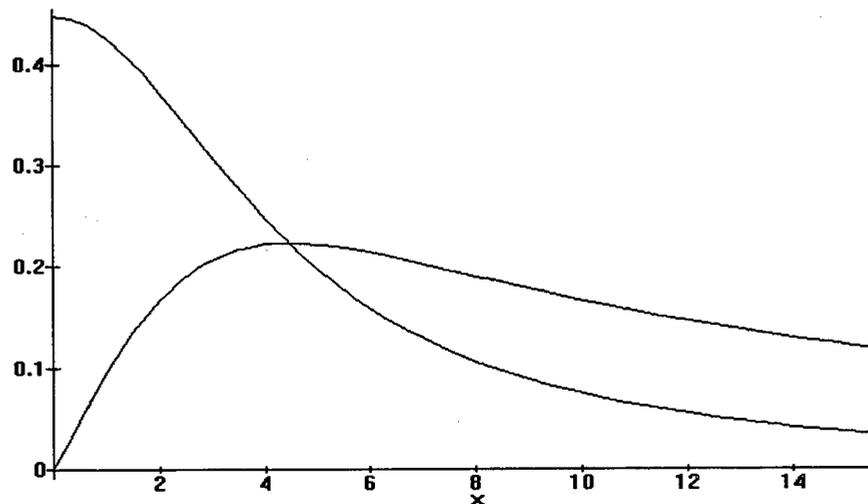


Figura 28 -Condutância e susceptância v.s. ordem harmônica.

3.2.2. O Modelo do Transformador

Um modelo conveniente para se determinar a ressonância em um transformador deve apresentar todos os enrolamentos do transformador, além de incluir todas as indutâncias mútuas e capacitâncias entre todos os enrolamentos, e a capacitância entre o enrolamento e a terra [26]. Todavia uma completa representação não é prática. A referência [30] mostra ensaios de ressonância feitos em transformadores utilizados na indústria. Nestes ensaios, a primeira ressonância ocorre numa faixa de frequência compreendida entre 7 *KHz* a 15 *KHz*, cujo modelo é aquele representado na figura 29.

Desde que o quadragésimo termo harmônico vale 2,4 *KHz*, somente a primeira ressonância é de interesse na análise. Nesta faixa de interesse, onde a frequência é menor que 3 *KHz*, a impedância de entrada tem um comportamento linear positivo relacionado com a frequência.

Para aumentar a exatidão do modelo do transformador, o ramo magnetizante é adicionado nas frequências harmônicas, conforme mostra a figura 30.

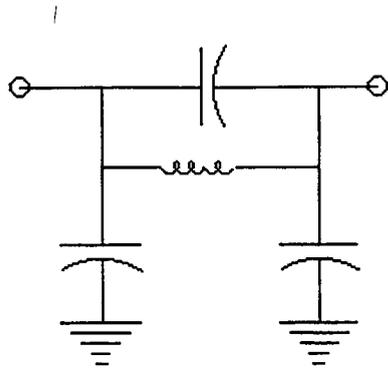


Figura 29- Modelo para a 1^o ressonância de um transformador.

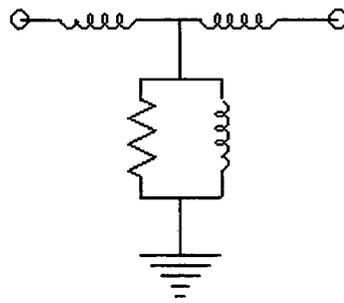


Figura 30 - Modelo incluindo o ramo magnetizante.

Como a frequência de ressonância interna, de transformadores de alta tensão, ocorre bem acima da faixa de interesse do estudo de penetração harmônica, a capacitância entre enrolamentos e a capacitância entre os enrolamentos e a terra têm um efeito muito pequeno na precisão dos resultados, o que explica a sua exclusão no modelo da figura 30.

Com o aumento da frequência há uma variação da resistência dos enrolamentos do transformador, o que provoca um aumento das perdas no condutor e no ferro, devido ao efeito pelicular. Na condição de que o transformador não opere na saturação, vários modelos são sugeridos na literatura para substituir a indutância de dispersão, computada na frequência fundamental, para as frequências harmônicas de interesse.

Os principais modelos de transformadores monofásicos são:

1 - O modelo apresentado pelo CIGRÉ, conforme a referência [31]. Este modelo sugere que a representação do transformador seja feita através de um modelo PI, estabelecido a partir de uma impedância Z_h , formada por uma resistência série R_s e uma associação paralela de outra resistência R_p com uma reatância X_h , conforme ilustra a figura 31.

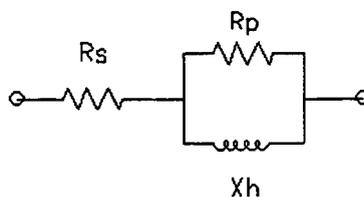


Figura 31 - Modelo CIGRÉ para o Transformador

$$X_h = h \times X_1 \quad (3.32)$$

A reatância X_l corresponde à reatância de dispersão do transformador na frequência fundamental. As resistências R_s e R_p são constantes para todas as frequências harmônicas, e seus valores são estimados por

$$R_s = \frac{X_1}{\tan(\psi_1)} \quad (3.33)$$

e

$$R_p = 10 \times X_1 \times \tan(\psi_1) \quad (3.34)$$

O valor da $\tan(\psi_1)$ é obtido de uma tabela em função da potência aparente nominal do transformador, ou pode ser aproximado pela fórmula (III-35), aplicável para transformadores que possuam potência aparente nominal situadas na faixa de 1 até 100 MVA .

$$\tan(\psi_1) = \exp[0.693 + 0.796 \times \ln(S_n) - 0.0421 \times (\ln(S_n))^2] \quad (3.35)$$

Leva-se ainda em conta as diferentes tensões nominais para a rede e para o transformador.

A impedância Z_h é convertida para admitância $Y_h = 1/Z_h$, em p.u., e combinada com a relação de transformação n , como mostrado na figura 32.

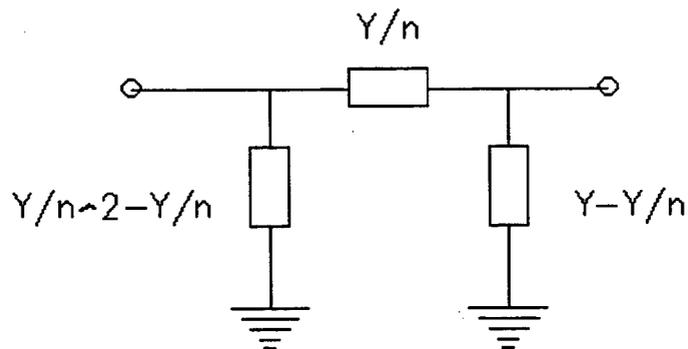
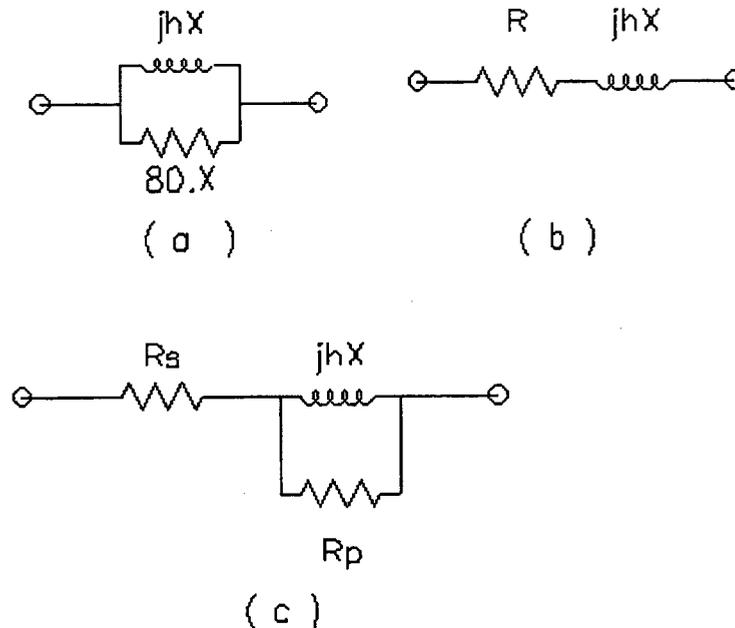


Figura 32. Modelo PI do Transformador

2- Outros modelos, propostos nas referências [3] e [32], são apresentados nas figuras (33-a (33a), (33-b) e (33-c).



Figuras 33 (a) ,(b) ,(c) - Modelos para os transformadores.

Na figura (33-a), X é a reatância de dispersão na frequência fundamental. Este modelo é descrito na referência [32].

$$\text{Na figura (32-b), } R = 0.1026 \times k \times h \times X_{(60.Hz)} \times (J + h) \quad (3.36)$$

onde J é a razão de histerese para as correntes de perdas de ordem harmônica ímpares, e apresenta um valor igual a três para grãos de silício e $k = 1 / (J+1)$.

Na figura (33-c), $90 \leq V^2 / S.R_s \leq 110$, $13 \leq S.R_p / V^2 \leq 30$, onde S é a potência aparente do transformador. Valores típicos, em *p.u.*, de R_s e R_p , são 0.04 e 60 para 30 MVA, respectivamente; e para potência nominal igual a 100 MVA esses valores são 0.01 e 20 *p.u.*

Portanto, as três principais características do transformador que podem afetar o fluxo harmônico são: a impedância de curto-circuito, a característica magnetizante e a conexão dos enrolamentos.

3.2.3. O Gerador

Quando uma corrente harmônica flui da rede elétrica para os enrolamentos do estator da máquina síncrona, ela cria um campo girante com uma velocidade maior do que a velocidade do rotor. Conseqüentemente, são induzidas correntes no rotor (enrolamento de campo, ou excitação). Assim, as correntes harmônicas interagem com ambas as indutâncias, de eixo direto e em quadratura. Este efeito é muito similar à ação da corrente de seqüência negativa na máquina síncrona. Na referência [33], a indutância média vista pela corrente de seqüência negativa, e portanto pelas correntes harmônicas pode ser calculada de forma aproximada como

$$L_2 = \frac{L''_d + L''_q}{2} \quad (3.37)$$

onde, L''_d é a indutância subtransitória de eixo direto, e L''_q é a indutância subtransitória de eixo em quadratura.

Levando-se em consideração o efeito pelicular para a resistência das máquinas rotativas, a resistência das máquinas geralmente aumenta com a frequência na forma de h^a , onde, h é a ordem harmônica e a está compreendido na faixa de 0,5 até 1,5. Normalmente se utiliza a raiz quadrada da ordem harmônica para considerar o efeito pelicular.

Outro modelo também freqüentemente utilizado, é aquele sugerido na referência [31], onde na frequência harmônica a máquina é representada por sua reatância subtransitória de eixo direto X''_d e por uma resistência, suposta igual a

$$R_1 = 0.1 \times X''_d \quad (3.38)$$

(correspondendo a uma constante de tempo subtransitória igual a 32 ms). Para uma frequência harmônica, a resistência e reatância são dadas por

$$\begin{aligned} X_h &= h \times X''_d \\ R_h &= \sqrt{h} \times R_1 \end{aligned} \quad (3.39) \text{ e } (3.40)$$

Estas fórmulas são provenientes de um estudo realizado segundo a referência [23],

onde a representação indicada na figura 34 é feita conectando estes dois parâmetros em série, uma das extremidades é conectada ao nó terra e a outra ao nó de conexão do gerador ao sistema.

nó de conexão ao sistema

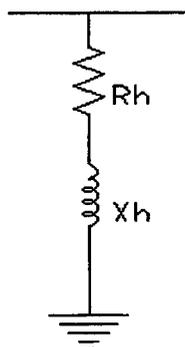


Figura 34 – Modelo do gerador

Para máquinas síncronas de pólos salientes, quando correntes desbalanceadas, principalmente as correntes de seqüência negativa de freqüência fundamental, circulam pelo enrolamento do estator, correntes harmônicas de segunda ordem são induzidas no enrolamento de campo. Estas, circulando no enrolamento de excitação, podem induzir uma terceira harmônica no enrolamento do estator.

Uma situação semelhante a esta surge devido à circulação de correntes harmônicas desequilibradas nos enrolamentos do estator. Sob estas condições, um mecanismo de conversão harmônica causa nas máquinas de pólos salientes uma geração de corrente harmônica. Modelos mais elaborados têm sido desenvolvidos para levar em conta tais efeitos [34].

3.2.4. Cargas Lineares Passivas

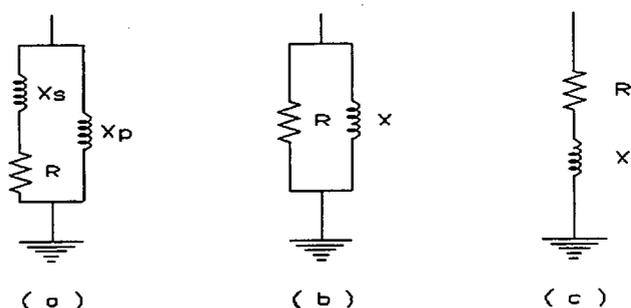
As cargas dos consumidores têm uma influência significativa na característica harmônica na rede. Elas não apenas constituem o principal elemento componente do amortecimento do sistema, mas também podem afetar as condições de ressonância do mesmo, principalmente nas altas freqüências. Medições efetuadas em diversos sistemas têm mostrado que as condições de máximo carregamento são resultado de uma redução da impedância nas baixas freqüências. Simulações em computadores digitais têm mostrado que a

adição de cargas pode resultar num aumento ou diminuição do fluxo harmônico. Conseqüentemente, uma representação adequada da carga é necessária. Entretanto, é difícil obter informações detalhadas sobre as cargas. Para os estudos de sistemas de potência as cargas são, na sua grande maioria, representadas como um agregado de elementos. Isto dificulta o estabelecimento de um modelo baseado apenas na análise teórica. Tentativas de desenvolver um modelo através de medições têm sido feitas, mas acredita-se que há ainda muito trabalho a ser realizado até que a validação desses modelos conduzam a uma maior confiança aos resultados.

O impacto do modelo da carga no resultado das correntes e tensões harmônicas é particularmente relevante quando se considera a ressonância em um ponto do sistema. Diferenças no cálculo da impedância na frequência de ressonância podem variar significativamente dependendo do modelo de carga.

Uma prática comum nos estudos de análise harmônica consiste em ignorar alguns efeitos aos quais as cargas estão sujeitas e representar as mesmas por um simples modelo constituído por uma combinação série ou paralela de uma resistência associada com a potência ativa da carga, e de um indutor associado a potência reativa. Visando obter um modelo mais realista quanto aos efeitos ocorridos na carga, algumas modificações foram estudadas para incorporar os fenômenos que a frequência promove na mesma.

A seguir são apresentados os modelos de carga mais comuns encontrados na literatura (figura 35) para as cargas lineares passivas, aplicáveis aos estudos de fluxo de carga harmônico, os quais foram obtidos da referência [30].



Figuras 35 - (a), (b) e (c) Modelos de cargas lineares .

Modelo (a) - CIGRÉ: Em uma faixa compreendida entre 5 a 20 vezes a frequência fundamental, a carga pode ser representada por uma reatância X_s em série com uma resistência R . Esta montagem está conectada em paralelo com uma reatância paralela X_p de tal forma que

$$R = \frac{U_{n.net}^2}{P_1}$$

$$X_s = 0.073 \times h \times R \quad (3.41, 3.42 \text{ e } 3.43)$$

$$X_p = \frac{h \times R}{6.7 \times \tan \psi_1 - 0.74}$$

onde, $U_{n.net}$ é a tensão nominal da rede (ou carga); P_1 é a potência ativa da carga na frequência fundamental submetida à tensão nominal, em condições normais de operação da rede; Q_1 é a potência reativa da carga (na frequência fundamental) sob tensão nominal; e

$$\tan \psi_1 = Q_1 / P_1 \quad (3.44)$$

Modelo (b) RL: Para a carga paralela, o cálculo dos elementos é feito através das expressões

$$R = \frac{U_{n.net}^2}{P_1} \quad (3.45)$$

$$X = h \times \frac{U_{n.net}^2}{Q_1} \quad (3.46)$$

Modelo (c) Motor: Para motores de indução, a indutância é calculada à partir da reatância de rotor bloqueado (ensaio de curto-circuito) na frequência fundamental. Nessas condições, portanto,

$$X_l = \frac{U^2}{S_{start}}$$

correspondendo a um $\cos \phi_{start} = 0.32$, e

$$R_l = X_l / 3.0$$

Para levar em conta o efeito pelicular, da mesma forma aplicada para os geradores, faz-se

$$R = \sqrt{h} \times R_l \quad (3.47)$$

e

$$X = h \times X_l \quad (3.48)$$

Um modelo para cargas lineares passivas, proposto por Berg [35], também é apresentado nesta seção. Este modelo consiste de um circuito equivalente monofásico de um motor trifásico, com modificações que representam os fenômenos ocorridos na máquina devido à frequência, em paralelo com uma resistência que representa uma fração da potência ativa. Toda potência reativa é suposta ser consumida pela máquina enquanto que o consumo de potência ativa é dividido entre as perdas associadas ao motor e a resistência equivalente representando cargas de aquecimento. Uma vez conhecida a quantidade de potência destinada à resistência de aquecimento, o valor do resistor em paralelo pode ser determinado.

A seguir, descreve-se a maneira pela qual os parâmetros do circuito equivalente monofásico do motor de indução são obtidos. Para isto, considere-se a figura 36.

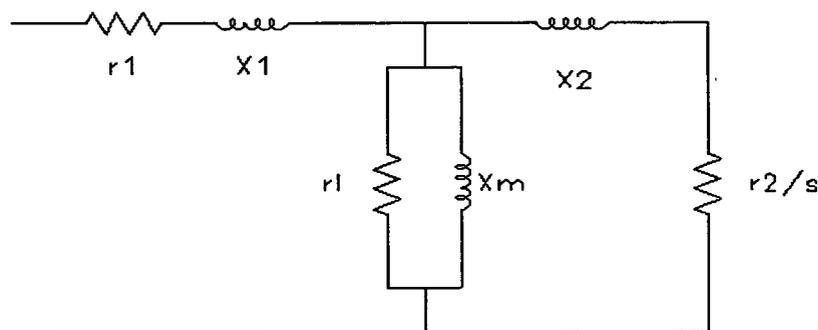


Figura 36- circuito equivalente monofásico do motor.

Na figura 36, os parâmetros r_l , (relacionado às perdas por correntes parasitas no ferro da máquina), e X_m , (associado à histerese) compoem o ramo magnetizante, são dependentes da frequência e devem ser corrigidos para cada frequência harmônica considerada. Com o aumento da frequência, o escorregamento aumenta tornando r_l e r_2/s desprezíveis quando

comparados com $X1$ e $X2$. É também razoável, fazer $X1$ igual a $X2$ e Xm aproximadamente igual a $35X1$. A 60 Hz , pode-se estimar que a corrente no ramo magnetizante é igual a 30% da corrente total entregue ao motor. Também nesta frequência a corrente que flui através de $r1$ é desprezível comparada àquela que atravessa Xm e $X2$. Portanto, a potência reativa consumida pelo motor a 60Hz é

$$\begin{aligned} Q_m/3 &= I^2 \times X_1 + (0.3 \times I)^2 \times X_m + (0.7 \times I)^2 \times X_2 \\ Q_m/3 &= 4.64 \times I^2 \times X_1 \end{aligned} \quad (3.49)$$

e, relacionando as grandezas V , I , P_m e Q_m e $X1$ (usando $V = 1\text{ p.u.}$) obtém-se

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} \times V \times I^* \\ I &= S^* / V^* \times \sqrt{3} \\ V &= 1\text{ p.u.} \\ I &= P_m - jQ_m / \sqrt{3} \\ |I| &= \sqrt{P_m^2 + Q_m^2} / 3 \\ I^2 &= P_m^2 + Q_m^2 / 3 \end{aligned} \quad (3.50)$$

A substituição da equação (3.50) na expressão (3.49) resulta em

$$X_1 = \frac{Q_m}{4.64(P_m^2 + Q_m^2)} \quad (3.51)$$

Após as simplificações consideradas, observando a figura 35 verifica-se que o paralelo entre Xm e $X2$ resulta em um valor aproximado de $X1$. Isto permite redesenhar o circuito da figura 35, com as simplificações feitas, em paralelo com a resistência equivalente das cargas de aquecimento. Obtém-se assim a figura 36, a qual representa a impedância de carga proposta por Berg [35].

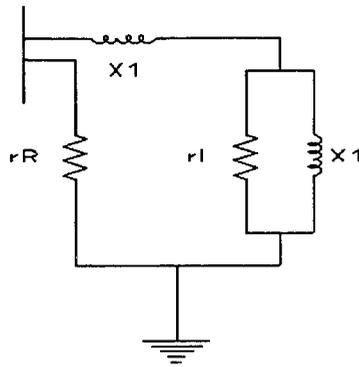


Figura 37- Impedância de carga proposta por Berg

3.2.5. Outros Elementos do Sistema

Todos os outros elementos do sistema, tais como a capacitância da linha e bancos de capacitores ou reatores, são considerados elementos com indutância ou capacitância constantes. Sendo assim, eles podem variar diretamente ou inversamente com a frequência dependendo da natureza do elemento.

3.3. Modificações no Método de Newton-Raphson Para Considerar o Efeito Harmônico das Cargas Não-Lineares

O método de Newton-Raphson, quando utilizado no estudo de fluxo de potência tradicional, não se apresenta estruturado adequadamente para resolver problemas onde são consideradas cargas não-lineares. Nesta seção são apresentadas duas possíveis modificações sobre o método tradicional de Newton, para que se possa incluir os efeitos da carga não-linear estudada na seção 2.4. Na referência [20], o método de Newton-Raphson é apresentado com detalhes. Basicamente o método consiste em determinar as tensões complexas que zeram os desbalanços de potência ativa e reativa nas barras. Nesta formulação existem três tipos de barras, a primeira é a barra de folga, a segunda a barra do tipo PV e a terceira do tipo PQ, designadas segundo as suas características físicas. Além desses três tipos, no estudo de Fluxo de Potência Harmônico aparece um quarto tipo de barra [36], denotada como PQNL, onde em adição à especificação das potências ativa e reativa, deve ser conhecida a forma da não-linearidade da carga (assumido ser o retificador em ponte apresentado na seção 2.4). Desde que se deseja obter as tensões harmônicas, em um sistema com n barras para h ordens harmônicas, serão necessárias $2 \times n \times h$ equações de balanço de corrente, semelhantes àquelas

apresentadas na seção 3.1. Também para cada ordem harmônica, os elementos da matriz de admitância de barra devem ser modificados conforme o procedimento apresentado nas seções 3.1 e 3.2. Após isto, eles são então utilizados nas equações de balanços de corrente e potências para suas frequências correspondentes.

Sumarizando, as incógnitas do fluxo de potência harmônico são:

1. $(n - 1)$ ângulos das tensões na frequência fundamental;
2. $(Npq + NpqNL)$ módulos das tensões na frequência fundamental;
3. $2nh$ módulos das tensões harmônicas e seus ângulos;

As equações necessárias são:

1. $(n - 1)$ equações de balanço de potência ativa;
2. $(Npq + NpqNL)$ equações de balanço de potência reativa;
3. $2nh$ equações de balanço de correntes (partes real e imaginária).

Portanto, deverá ser resolvido um sistema com $2n(h+1) - Npv - 2$ equações não-lineares. Para a obtenção desta solução é apresentada a seguir uma estratégia baseada no método de Newton, reformulado para duas situações diferentes relativas a entrada de dados. Com respeito ao número de iterações necessárias para a convergência deste método, apesar de que o número típico de iterações necessário para a convergência do fluxo de potência convencional (com apenas cargas lineares) é entre dois e seis, no estudo de fluxo de potência harmônico são necessários de dez a trinta iterações para a convergência.

Segundo [36], três fatores principais afetam a convergência do método Newton-Raphson modificado:

1. A estimativa inicial do módulo e do ângulo das tensões harmônicas. Por serem estas quantidades em geral difíceis de serem calculadas, o seu valor inicial pode estar longe da solução (principalmente o ângulo das tensões);
2. A medição exata do valor da potência reativa devido à defasagem entre a tensão e corrente;
3. As aproximações nas submatrizes de derivadas parciais da corrente da carga não-linear em uma dada frequência com relação a tensão terminal em outra frequência, causada pela inicialização.

A tolerância utilizada no fluxo de potência harmônico por sua vez, é menor que a utilizada pelo método convencional, em virtude das tensões harmônicas apresentarem amplitudes menores quando comparadas com a da componente fundamental.

Uma estimativa inicial razoável para o problema de fluxo de potência harmônico, pode ser calculada via um fluxo de carga convencional, aproximando as cargas não-lineares por cargas lineares. Ao término deste processo a tensão fundamental aproximada é obtida. Através das equações (2.56) e (2.57) determinam-se as partes real e imaginária das injeções de correntes harmônicas nas barras de cargas não-lineares, e com estas calcula-se então as tensões harmônicas, conforme mostrado na seção 3.1. Da mesma forma que no processo convencional, a disponibilidade de valores iniciais próximos da solução final diminui o número de iterações necessárias à solução.

Além dessas dificuldades, existe ainda o acoplamento entre tensões de frequências diferentes em uma dada corrente harmônica de uma carga não-linear. Por exemplo, as tensões terminais em uma barra de carga não-linear de ordem fundamental e terceira harmônicas contribuem para a criação da corrente de terceira harmônica nesta barra, não podendo seu efeito ser desprezado.

3.3.1. Método de Newton Modificado: Medidas Corretas das Injeções de Potência são Disponíveis nas Barras PQNL

Na possibilidade de se dispor de medidas confiáveis para as potências reativas, obtidas via equipamentos sofisticados de fabricantes como a ELCONTROL (Itália) ou AMPROBE (USA), onde a metodologia adotada para a medição das grandezas elétricas utilizada está baseada no modelo desenvolvido por Bodeanu, o método de Newton pode ser reformulado, com as seguintes modificações:

- 1- Para um sistema com n barras, sendo reordenado para que a primeira delas seja a barra de folga, seguida das barras PV e PQ, e por fim as barras PQNL;
- 2- Nas frequências harmônicas, as cargas lineares das barras PQ são modeladas como admitâncias shunt e somadas aos elementos diagonais da matriz admitância de barra. Os geradores são representados através da sua reatância subtransitória ligada a terra, e esta representação também é incorporada ao elemento diagonal da matriz de

admitância na frequência harmônica. Diante dessas considerações, as referências [36] e [5] mostram que as potências ativa e reativa das cargas lineares são determinadas apenas pelas componentes fundamentais de corrente e tensão. Ressalte-se que a potência aparente é composta por três parcelas, sendo na potência de distorção harmônica que se verifica o efeito das harmônicas na carga linear, sendo portanto alterado o seu fator de potência. Desta forma as equações de balanço de potência para as cargas lineares são as mesmas conhecidas para o caso convencional, ou seja

$$P_i^{esp} = P_{G,i} - P_{D,i} = P_i^{calc} = V_i^{(1)} \sum V_j^{(1)} \times (G_{ij}^{(1)} \times \cos(\theta_i^{(1)} - \theta_j^{(1)}) + B_{ij}^{(1)} \times \sin(\theta_i^{(1)} - \theta_j^{(1)})) \quad (3.52)$$

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i^{calc} = 0$$

$$Q_i^{esp} = Q_{G,i} - Q_{D,i} = Q_i^{calc} = V_i^{(1)} \sum V_j^{(1)} \times (G_{ij}^{(1)} \times \sin(\theta_i^{(1)} - \theta_j^{(1)}) - B_{ij}^{(1)} \times \cos(\theta_i^{(1)} - \theta_j^{(1)})) \quad (3.53)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{calc} = 0$$

3- Para as cargas não-lineares, os estudos apresentados nas referências [5] e [36] mostram que as harmônicas incrementam as injeções de potência ativa e reativa. Assim as equações de balanço para as cargas não-lineares são:

$$P_i^{esp} = -P_{D,i} = P_i^{calc} = \sum_{h=1}^{3,5..H} V_i^{(h)} \sum V_j^{(h)} \times (G_{ij}^{(h)} \times \cos(\theta_i^{(h)} - \theta_j^{(h)}) + B_{ij}^{(h)} \times \sin(\theta_i^{(h)} - \theta_j^{(h)})) \quad (3.54)$$

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i^{calc} = 0$$

$$Q_i^{esp} = -Q_{D,i} = Q_i^{calc} = \sum_{h=1}^{3,5..H} V_i^{(h)} \sum V_j^{(h)} \times (G_{ij}^{(h)} \times \sin(\theta_i^{(h)} - \theta_j^{(h)}) - B_{ij}^{(h)} \times \cos(\theta_i^{(h)} - \theta_j^{(h)})) \quad (3.55)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{calc} = 0$$

4- Para que se possa calcular as tensões harmônicas em todas as barras, equações de balanço de correntes devem ser acrescentadas para cada ordem harmônica característica desejada. Estas equações são da forma introduzida na seção 3.1. Ou seja, para as partes real e imaginária da corrente: equações (3.7) e (3.8) no caso de cargas lineares, e equações (3.11) e (3.12) para as cargas não-lineares, expressões reescritas a seguir.

Para as cargas lineares:

$$\begin{aligned}
 I_{i, re}(h) &= V_{i(h)} \times [G_{ii}(h) \times \cos(\theta_{i(h)}) - B_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_{i(h)})] + \dots \\
 &\dots \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \cos(\theta_{j(h)}) - B_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_{j(h)})] \\
 I_{i, im}(h) &= V_i(h) \times [G_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_{i(h)}) + B_{ii}(h) \times \cos(\theta_{i(h)})] + \dots \\
 &\dots \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_{j(h)}) + B_{ij}(h) \times \cos(\theta_{j(h)})]
 \end{aligned}$$

Para as cargas não-lineares:

$$\begin{aligned}
 I_{i, re}(h) &= b_i(h) + V_{i(h)} \times [G_{ii}(h) \times \cos(\theta_{i(h)}) - B_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_{i(h)})] + \dots \\
 &\dots \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \cos(\theta_{j(h)}) - B_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_{j(h)})] \\
 I_{i, im}(h) &= a_i(h) + V_i(h) \times [G_{ii}(h) \times \text{sen}(\theta_i(h)) + B_{ii}(h) \times \cos(\theta_i(h))] + \dots \\
 &\dots \sum V_j(h) \times [G_{ij}(h) \times \text{sen}(\theta_j(h)) + B_{ij}(h) \times \cos(\theta_j(h))]
 \end{aligned}$$

A formulação matricial do método de Newton, levando em conta as considerações feitas anteriormente recai no sistema de equações lineares dado por:

$$[\Delta M] = [J] \times [\Delta U] \quad (3.36)$$

o qual pode ser subdividido em :

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \\ [\Delta J_{RE}^{(3)}] \\ [\Delta J_{IM}^{(3)}] \\ \vdots \\ [\Delta J_{RE}^{(H)}] \\ [\Delta J_{IM}^{(H)}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Jac^{(1)}] & [Jac^{(3)}] & \dots & [Jac^{(H)}] \\ [YG_{RE}^{(3,1)}] & [YG_{RE}^{(3,3)}] & 0 \dots & 0 \\ [YG_{IM}^{(3,1)}] & [YG_{IM}^{(3,3)}] & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [YG_{RE}^{(H,1)}] & 0 & 0 \dots & [YG_{RE}^{(H,H)}] \\ [YG_{IM}^{(H,1)}] & 0 & 0 \dots & [YG_{IM}^{(H,H)}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\Delta \theta^{(1)}] \\ [\Delta V^{(1)}] \\ [\Delta \theta^{(3)}] \\ [\Delta V^{(3)}] \\ \vdots \\ [\Delta \theta^{(H)}] \\ [\Delta V^{(H)}] \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

As submatrizes que constituem a Jacobiana do método de Newton, podem ser melhor entendidas pela forma explícita apresentada pela equação (3.38).

$$\begin{bmatrix}
\Delta P_{Npv+Npq2 \rightarrow m-1} \\
\Delta Q_{Npq} \\
\Delta P_{NpqNL, m \rightarrow n} \\
\Delta Q_{NpqNL} \\
\Delta I_{RE1 \rightarrow (m-1)}^{(3)} \\
\Delta I_{RE, m \rightarrow n}^{(3)} \\
\Delta I_{IM1 \rightarrow (m-1)}^{(3)} \\
\Delta I_{IM, m \rightarrow n}^{(3)} \\
\vdots \\
\Delta I_{RE1 \rightarrow (m-1)}^{(H)} \\
\Delta I_{RE, m \rightarrow n}^{(H)} \\
\Delta I_{IM1 \rightarrow (m-1)}^{(H)} \\
\Delta I_{IM, m \rightarrow n}^{(H)}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\frac{Jac_{RE-l}^{(1)}}{Jac_{Im-l}^{(1)}} \\
\frac{Jac_{RE-nl}^{(1)}}{Jac_{Im-nl}^{(1)}} \\
0 \\
\frac{YG_{Re-nl}^{(3,1)}}{YG_{IM-nl}^{(3,1)}} \\
\vdots \\
0 \\
\frac{YG_{Re-nl}^{(H,1)}}{YG_{IM-nl}^{(H,1)}}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
0 \\
0 \\
\frac{Jac_{RE-nl}^{(3)}}{Jac_{Im-nl}^{(3)}} \\
\frac{YG_{RE-l}^{(3,3)}}{YG_{RE-nl}^{(3,3)}} \\
\frac{YG_{IM-l}^{(3,3)}}{YG_{IM-nl}^{(3,3)}} \\
\vdots \\
0 \\
\vdots
\end{bmatrix}
\cdots
\begin{bmatrix}
0 \\
0 \\
\frac{Jac_{RE-nl}^{(H)}}{Jac_{Im-nl}^{(H)}} \\
[0] \\
\frac{YG_{RE-l}^{(H,H)}}{YG_{RE-nl}^{(H,H)}} \\
\frac{YG_{IM-l}^{(H,H)}}{YG_{IM-nl}^{(H,H)}}
\end{bmatrix}
\times
\begin{bmatrix}
\frac{\Delta \theta_l^{(1)}}{\Delta V_l^{(1)}} \\
\frac{\Delta \theta_{nl}^{(1)}}{\Delta V_{nl}^{(1)}} \\
\frac{\Delta \theta_l^{(3)}}{\Delta V_l^{(3)}} \\
\frac{\Delta \theta_{nl}^{(3)}}{\Delta V_{nl}^{(3)}} \\
\vdots \\
\frac{\Delta \theta_l^{(H)}}{\Delta V_l^{(H)}} \\
\frac{\Delta \theta_{nl}^{(H)}}{\Delta V_{nl}^{(H)}}
\end{bmatrix}
\tag{3.38}$$

onde:

$\Delta P_{Npv+Npq}$ - é o vetor de resíduos de potência ativa nas barras PV e PQ (eq. (3.32));

ΔQ_{Npq} - é o vetor de resíduos de potência reativa nas PQ (eq. (3.33));

ΔP_{NpqNL} - é o vetor de resíduos de potência ativa nas barras PQNL (eq.(3.34));

ΔQ_{NpqNL} - é o vetor de resíduos de potência reativa nas barras PQNL (eq. (3.35));

$\Delta I_{RE-l}^{(k)}$ - é o vetor de resíduos da parte real das injeções de corrente harmônica de ordem k das barras de geração (incluindo a de folga) e das barras PQ (eq. (3.7));

$\Delta I_{RE-nl}^{(k)}$ - é o vetor de resíduos da parte real das injeções de corrente harmônica de ordem k das PQNL (eq. (3.11));

$\Delta I_{IM-l}^{(k)}$ - é o vetor de resíduos da parte imaginária das injeções de corrente harmônica de ordem k das barras de geração (incluindo a de folga) e das barras PQ (eq. (3.8));

$\Delta I_{IM-nl}^{(k)}$ - é o vetor de resíduos da parte imaginária das injeções de corrente harmônica de ordem k das barras do tipo PQNL (eq.(3.12));

$$\begin{bmatrix} \frac{Jac_{RE-l}^{(1)}}{Jac_{Im-l}^{(1)}} \\ \frac{Jac_{RE-nl}^{(1)}}{Jac_{Im-nl}^{(1)}} \end{bmatrix}$$

- é a matriz Jacobiana das equações de injeção de potência na frequência fundamental, calculada na forma convencional, e cujas equações dos seus elementos constituintes é apresentada no apêndice 2. Sua dimensão é $(NPV + 2NPQT) \times (NPV + 2NPQT)$.

$$\begin{bmatrix} \frac{0}{0} \\ \frac{Jac_{RE-nl}^{(H)}}{Jac_{Im-nl}^{(H)}} \end{bmatrix}$$

- é a matriz Jacobiana das equações de injeção de potência na frequência harmônica, sendo que para as barras de cargas não-lineares os elementos constituintes são calculados através das mesmas equações de derivadas parciais das potências ativas e reativas apresentadas no Apêndice 2, corrigidas para a frequência harmônica. Para as demais barras os elementos constituintes são nulos, pois seus efeitos estão representados na matriz de admitância na frequência harmônica. Sua dimensão é $(NPV + 2NPQ) \times 2n$.

$$\begin{bmatrix} \frac{0}{YG_{Re-nl}^{(H,1)}} \\ \frac{0}{YG_{IM-nl}^{(H,1)}} \end{bmatrix}$$

- é a matriz das derivadas parciais das expressões da harmônica (H) de corrente na carga não-linear, com respeito a sua tensão terminal na frequência fundamental, conforme é mostrado no Apêndice 2. Sua dimensão é $2n \times (NPV + 2NPQT)$.

$$\begin{bmatrix} \frac{YG_{RE-l}^{(H,H)}}{YG_{RE-nl}^{(H,H)}} \\ \frac{YG_{IM-l}^{(H,H)}}{YG_{IM-nl}^{(H,H)}} \end{bmatrix}$$

- é uma matriz de dimensão $2n \times 2n$, das derivadas parciais das equações de balanço de corrente nas frequências harmônicas (H) com respeito ao módulo e ângulo das

tensões de mesma frequência harmônica. Estas matrizes são blocos diagonais da matriz Jacobiana do sistema, seus elementos podem ser calculados pelas expressões anexadas no Apêndice B.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\theta_l^{(H)}}{\Delta\theta_{nl}^{(H)}} \\ \frac{\Delta V_l^{(H)}}{\Delta V_{nl}^{(H)}} \end{bmatrix}$$

- é o vetor de incremento dos ângulos e módulos das tensões na frequência H (H é ímpar: 1, 3, 5... H_{max}).

Na figura 38 é apresentado o fluxograma do método de Newton para o Fluxo de Potência Harmônico.

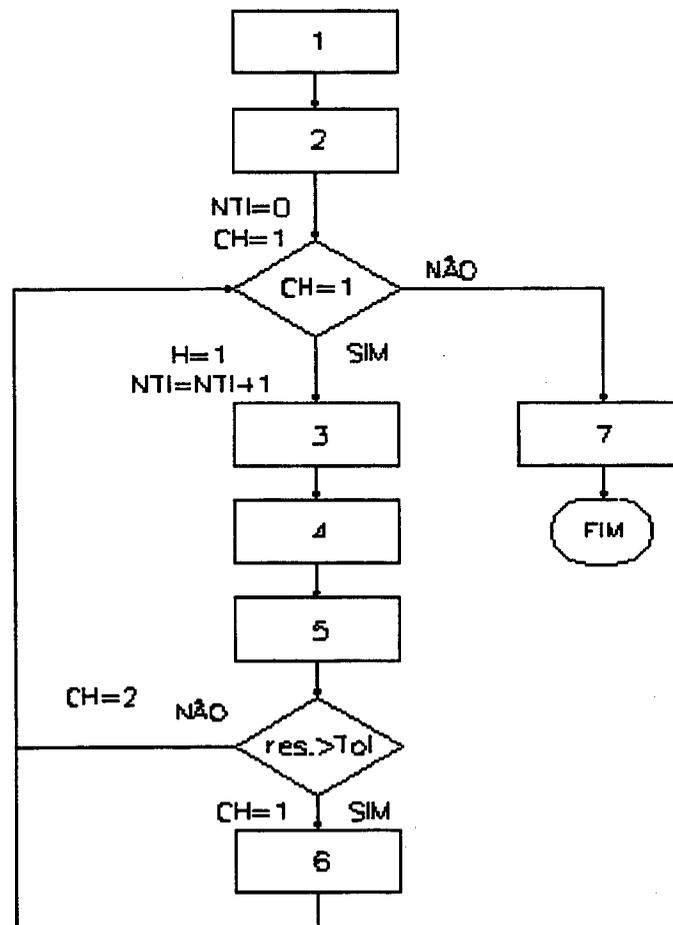


Figura 38 - Fluxograma do Fluxo de Potência Harmônico via Newton-Raphson.

Na figura 38 os blocos integrantes apresentam as seguintes funções:

Bloco 1 - Lê os dados de entrada, ou seja, dados de linha e de barra, e reordena as

barras na seqüência $V\delta \rightarrow PV \rightarrow PQ \rightarrow PQNL$.

Bloco 2 - Calcula as condições iniciais, utilizando o método de Newton convencional para estimação das tensões de freqüência fundamental. Com estas tensões calculam-se as correntes harmônicas nas cargas não-lineares. Através de um *loop* de ordens harmônicas, determinam-se as matrizes de admitância de barra em cada uma das freqüências harmônicas e resolve-se o sistema linear:

$$[I^{(H)}] = [Y_{Barra}^{(H)}] \times [V^{(H)}]$$

Obtendo desta forma as tensões harmônicas iniciais.

Bloco 3 - Este bloco executa as seguintes tarefas:

- 1- Determina a matriz admitância de barra na freqüência fundamental e calcula (n-1) equações de $P_i^{calc(1)}$ e (NPQT) equações de $Q_i^{calc(1)}$;
- 2- Calcula a matriz Jacobiana das equações do fluxo de potência na freqüência fundamental;
- 3- Calcula as correntes harmônicas nas barras de cargas não-lineares pelas equações (2.19 e 2.20) e as armazena em IFre(k) e IFim(k).
- 4 - Calcula as Jacobianas das correntes harmônicas nas cargas não-lineares criadas pelas tensões terminais na freqüência fundamental.

Bloco 4 - Loop harmônico para as freqüências harmônicas de ordens ímpares de 3 à 11 com passo 2, neste bloco são montados:

- 1- A matriz admitância de barra na freqüência harmônica. Também são calculadas (NPQNL) equações de $P_i^{calc(H)}$, (NPQNL) equações de $Q_i^{calc(H)}$, para as barras de cargas não-lineares;
- 2- A submatriz Jacobiana das equações do fluxo de potência das barras de cargas não-lineares na freqüência harmônica. As demais barras recebem valores nulos nesta submatriz;
- 3 - As submatrizes Jacobianas das injeções de correntes na freqüência harmônica, para todas as barras do sistema. Essas submatrizes são blocos diagonais ($YG^{(H,H)}$).

Bloco 5 - Calcula os resíduos de potência e corrente.

Bloco 6 - Realiza as seguintes tarefas:

1- Resolve o sistema (3.7), via triangularização da matriz Jacobiana e aplicação de substituição inversa, obtendo então o vetor de incrementos;

2 - Atualiza os módulos e ângulos das tensões fundamentais e harmônicas.

Bloco7 - Imprime tabelas de dados e resultados, contendo :

1- As tensões fundamentais e as harmônicas para todas as barras do sistema e suas respectivas taxas de distorção ;

2 - As perdas de potência na transmissão;

3 - Os despachos de potência na barra de folga e as potências reativas das barras PV.

3.3.2. Método Modificado de Newton, na Falta de Medidas Corretas das Potências Ativas e Reativas nas Barras NPQNL

Devido à dificuldade de medição de potência em sistemas com formas de ondas distorcidas, ou no caso de indisponibilidade de equipamentos apropriados para efetuar tais medições nas barras de cargas não-lineares, outra proposta de formulação é apresentada considerando as equações de balanço de corrente para as cargas não-lineares na frequência fundamental ao invés das equações de balanço de potência. Assim o sistema de equações (3.58) é modificado para o sistema (3.59) conforme mostrado a seguir.

$$\begin{bmatrix}
\Delta P_{Npv+Npq} \ 2 \rightarrow m-1 \\
\Delta Q_{Npq} \\
\Delta I_{RE_{m \rightarrow n}}^{(1)} \\
\Delta I_{IM_{m \rightarrow n}}^{(1)} \\
\Delta I_{RE_{1 \rightarrow (m-1)}}^{(3)} \\
\Delta I_{RE_{m \rightarrow n}}^{(3)} \\
\Delta I_{IM_{1 \rightarrow (m-1)}}^{(3)} \\
\Delta I_{IM_{m \rightarrow n}}^{(3)} \\
\vdots \\
\Delta I_{RE_{1 \rightarrow (m-1)}}^{(H)} \\
\Delta I_{RE_{m \rightarrow n}}^{(H)} \\
\Delta I_{IM_{1 \rightarrow (m-1)}}^{(H)} \\
\Delta I_{IM_{m \rightarrow n}}^{(H)}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\frac{Jac_{RE-l}^{(1)}}{YG_{RE-nl}^{(1,1)}} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & & & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
\frac{Jac_{IM-l}^{(1)}}{YG_{IM-nl}^{(1,1)}} & & & & \\
0 & \frac{YG_{RE-l}^{(3,3)}}{YG_{RE-nl}^{(3,3)}} & & & \\
\frac{YG_{RE-nl}^{(3,1)}}{YG_{IM-l}^{(3,1)}} & \frac{YG_{RE-nl}^{(3,3)}}{YG_{IM-nl}^{(3,3)}} & & & \\
0 & & & & [0] \\
\frac{YG_{IM-nl}^{(3,1)}}{YG_{IM-nl}^{(3,3)}} & \frac{YG_{IM-l}^{(3,3)}}{YG_{IM-nl}^{(3,3)}} & & & \\
\vdots & & & & \\
\vdots & & & & \\
0 & & & & \\
\frac{YG_{RE-nl}^{(H,1)}}{YG_{IM-l}^{(H,1)}} & & & & \\
0 & & & & \\
\frac{YG_{IM-nl}^{(H,1)}}{YG_{IM-nl}^{(H,1)}} & & & & \\
\vdots & & & & \\
\vdots & & & & \\
0 & & & & \\
\frac{YG_{RE-l}^{(H,H)}}{YG_{RE-nl}^{(H,H)}} & & & & \\
\frac{YG_{RE-nl}^{(H,H)}}{YG_{IM-l}^{(H,H)}} & & & & \\
\frac{YG_{IM-l}^{(H,H)}}{YG_{IM-nl}^{(H,H)}} & & & & \\
\frac{YG_{IM-nl}^{(H,H)}}{YG_{IM-nl}^{(H,H)}} & & & &
\end{bmatrix}
\times
\begin{bmatrix}
\frac{\Delta \theta_l^{(1)}}{\Delta V_l^{(1)}} \\
\frac{\Delta \theta_{nl}^{(1)}}{\Delta V_{nl}^{(1)}} \\
\frac{\Delta \theta_l^{(3)}}{\Delta V_l^{(3)}} \\
\frac{\Delta \theta_{nl}^{(3)}}{\Delta V_{nl}^{(3)}} \\
\vdots \\
\frac{\Delta \theta_l^{(H)}}{\Delta V_l^{(H)}} \\
\frac{\Delta \theta_{nl}^{(H)}}{\Delta V_{nl}^{(H)}}
\end{bmatrix}
\tag{3.59}$$

Os vetores e submatrizes do sistema (3.59), são calculados de forma análoga àquela apresentada na seção 3.3.1. Uma vantagem desta formulação sobre a anterior é que esta se apresenta mais flexível quanto às variações das variáveis de controle de um sistema de potência (tensões dos geradores, taps dos transformadores etc). Isto permite o estudo de harmônicas em situações de contingência, e não somente a avaliação harmônica em um ponto de operação base, definido pelas medições de potências nas cargas não-lineares sujeitas neste caso ao ajuste dos geradores e transformadores.

3.4. Fluxo de Carga Harmônico Através do Método das Somas de Correntes

Nos sistemas de distribuição existe uma predominância da configuração radial na rede de alimentação elétrica. Esta característica pode dificultar a convergência de alguns métodos (Newton-Raphson, Gauss-Seidel). Uma das razões pelas quais isto acontece é que uma inicialização imprópria tende a retardar o processo de cálculo dos incrementos de tensão ao

longo das iterações, ou mesmo ocasionar problemas de condicionamento numérico nas matrizes envolvidas. Outras características observadas no sistema de distribuição são:

- A baixa relação X/R (em geral menor do que a unidade) dos ramais de alimentação;
- Tensões baixas, causadas pelo alto carregamento do sistema;
- Abertura angular elevada entre as barras; e
- Altas e baixas impedâncias entre os nós consecutivos.

Um método desenvolvido especificamente para as características radiais do sistema de distribuição é o método da Soma das Injeções de Corrente, apresentado na referência [37]. Sua formulação, baseada em injeções de corrente, é adequada para a adaptação do estudo de fluxo de carga harmônico, uma vez que as cargas não-lineares são representadas por equações de corrente. Apresenta-se a seguir, este método e a sua reformulação para o caso da análise harmônica.

3.4.1. O Método da Soma das Injeções de Corrente

Este método consiste basicamente em calcular as tensões complexas nas barras de cargas de um sistemas radial, como exemplifica a figura 39. Nesta, são especificadas as potências nas barras de carga e o valor da tensão do gerador, o qual é a barra de referência do sistema. A partir de estimativas iniciais das tensões nas barras de cargas são calculadas as correntes em cada linha (trecho alimentador), e a partir do nó de referência são corrigidas as tensões nas barras de cargas, utilizando-se as quedas de tensão calculadas ao longo das linhas de distribuição.

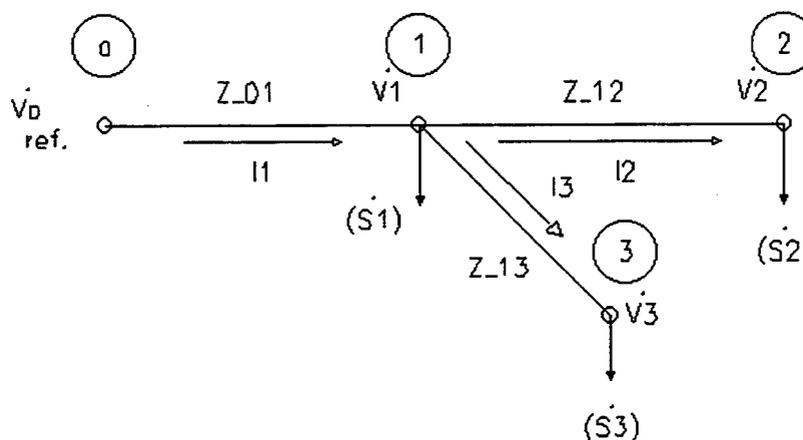


Figura 39 - Diagrama de um sistema radial

Portanto, o processo iterativo para a determinação das tensões complexas do sistema radial apresentado na figura 39 consiste nas seguintes etapas:

1- Partindo-se de uma estimativa inicial das tensões nos pontos 1, 2 e 3, são calculadas as correntes acumuladas em cada trecho do sistema radial. Assim, com os valores de $V_1^{(0)}, V_2^{(0)}$ e $V_3^{(0)}$, são calculadas as correntes em cada trecho, as quais são expressas como:

$$I_3^{(0)} = \left(\frac{\dot{S}_3}{V_3^{(0)}} \right)^* , \quad I_2^{(0)} = \left(\frac{\dot{S}_2}{V_2^{(0)}} \right)^* \quad \text{e} \quad I_1^{(0)} = \left(\frac{\dot{S}_1}{V_1^{(0)}} \right)^* + I_2^{(0)} + I_3^{(0)}$$

onde: * denota o conjugado da expressão complexa entre parênteses.

2- Partindo-se do nó de referência (barra de geração), procedem-se as correções das tensões nas barras através das quedas de tensões nas linhas calculadas no passo anterior:

$$\begin{aligned} V_1^{(1)} &= V_0 - Z_{01} \times I_1^{(0)} \\ V_2^{(1)} &= V_1^{(1)} - Z_{12} \times I_2^{(0)} \\ V_3^{(1)} &= V_2^{(1)} - Z_{23} \times I_3^{(0)} \end{aligned}$$

3- É realizado o teste de convergência, pela diferença entre os módulos das tensões em cada barra do sistema em duas iterações consecutivas. Caso algum valor se encontre maior que a tolerância estabelecida volta-se ao passo 1, repetindo-se o procedimento iterativo, até a convergência.

$$\left| V_i^{(n)} - V_i^{(n-1)} \right| \leq \varepsilon$$

Uma das vantagens deste método é que não são calculadas derivadas parciais com relação ao módulo das tensões e seus argumentos, e nem são determinadas matrizes de maior porte que necessitem de posterior fatoração na solução do sistema de equações. Nos casos onde a sua aplicação é adequada, a metodologia também apresenta uma convergência mais

rápida e uma precisão satisfatória em relação ao método de Newton-Raphson. O Apêndice 3 mostra alguns detalhes associados a implementação deste método, incluindo as subrotinas escritas na linguagem FORTRAN.

3.4.2. Aplicação do Método da Soma das Injeções de Corrente no Fluxo de Carga Harmônico

As correntes na frequência fundamental ou síncrona nas barras de cargas não-lineares são independentes das tensões harmônicas nos seus terminais. Isto em princípio permitiria calcular as tensões na frequência fundamental, a parte do cômputo das harmônicas. No entanto, conforme visto na seção 2.4, existe acoplamento das correntes harmônicas das cargas não-lineares com a sua tensão terminal na frequência fundamental e também com a tensão de alguma outra ordem harmônica (por exemplo, a corrente de 9ª harmônica é criada devido às tensões fundamental, de terceira e nona harmônica). Portanto, a determinação das tensões harmônicas deve ser feita após o cálculo da fundamental, a fim de se ter uma melhor estimativa inicial para a solução. Utilizando o princípio da superposição, cada tensão harmônica é calculada pelas injeções de corrente harmônica resultante da não linearidade da carga em questão.

Apresenta-se a seguir a solução dos sistemas de equações não-lineares nas frequências fundamental e harmônica.

3.4.2.1. Método das Somas das Injeções de Corrente Para a Determinação das Tensões na Frequência Fundamental

Desde que as correntes na frequência fundamental das cargas não-lineares são independentes, é possível determinar as tensões na frequência fundamental das barras de cargas de um sistema radial, conforme ilustrado na figura 40, da forma descrita na subseção anterior. Neste caso, são conhecidas as potências das cargas lineares, as características das cargas não-lineares (retificador mostrado na seção II.4), e a tensão de alimentação do gerador, além dos parâmetros das linhas de distribuição .

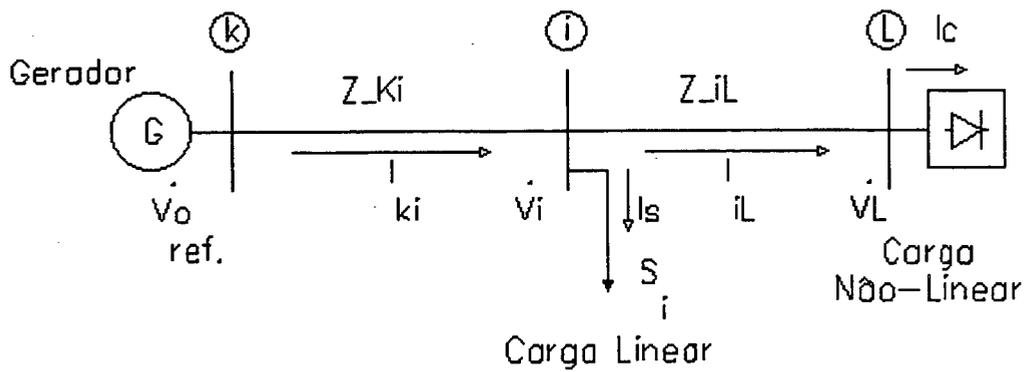


Figura 40 - Sistema radial alimentando uma carga não-linear .

Aplicando-se a lei de Kirchhoff das correntes ao nó i , obtém-se :

$$I_{ki} = I_{s_i} + I_{il}$$

A corrente na carga conectada a barra i é calculada como

$$I_{s_i}^{(0)} = \left(\frac{\dot{S}_i}{\dot{V}_i^{(0)}} \right)^* \quad (3.60)$$

cujas partes reais e imaginárias são

$$I_{\text{Re}_s} = \left(\frac{1}{\dot{V}_i} \right) \times (P \times \cos(\theta_i) + Q \times \sin(\theta_i)) \quad (3.61)$$

$$I_{\text{Im}_s} = \left(\frac{1}{\dot{V}_i} \right) \times (P \times \sin(\theta_i) - Q \times \cos(\theta_i)) \quad (3.62)$$

A corrente que flui entre os nós i e l é igual à corrente acumulada no nó l , a qual nesta situação é igual à corrente na carga não-linear determinada pelas expressões da corrente do retificador monofásico apresentadas na seção II.4, isto é, equações (2.58) e (2.59). Assim

$$I_{il} = b_i + j \times a_i$$

Calculada a corrente em cada trecho do sistema, são então corrigidas as tensões nas barras de carga, partindo-se da barra de geração, onde é conhecida a tensão, utilizando as quedas de tensão nas linhas de transmissão, até que se chegue à barra mais remota do sistema,

através das seguintes equações :

$$E_i = E_k - Z_{ki} \times I_{ki}$$

As partes real e imaginária desta equação são expressas por

$$V_{iRe} = (V_k \times \cos(\theta_k) - [R_{ki} \times Ire_{ki} - X_{ki} \times Im_{ki}]) \quad (3.63)$$

$$V_{iIm} = (V_k \times \sin(\theta_k) - [R_{ki} \times Im_{ki} + X_{ki} \times Ire_{ki}]) \quad (3.64)$$

onde :

R_{ki} é a resistência efetiva (a 60 Hz) do ramal de distribuição que interliga as barras k e i ;

X_{ki} é a reatância indutiva a (60 Hz) do ramal de distribuição que interliga as barras k e i ;

Im_{ki} é a parte imaginária da corrente no ramal de distribuição que flui do nó k para o nó i ;

Ire_{ki} é a parte real da corrente no ramal de distribuição que flui do nó k para o nó i .

Logo o módulo da tensão é dado por

$$V_i = \sqrt{(V_i Re)^2 + (V_i Im)^2} \quad (3.65)$$

e seu argumento é calculado como

$$\theta_i = \arctg\left(\frac{V_i Im}{V_i Re}\right) \quad (3.67)$$

Conforme visto na seção 3.1, este processo é repetido até que se alcance a convergência das tensões.

Com base no procedimento descrito anteriormente, desenvolveu-se um algoritmo, para posterior implementação computacional na linguagem FORTRAN, apresentado no fluxograma da figura 41.

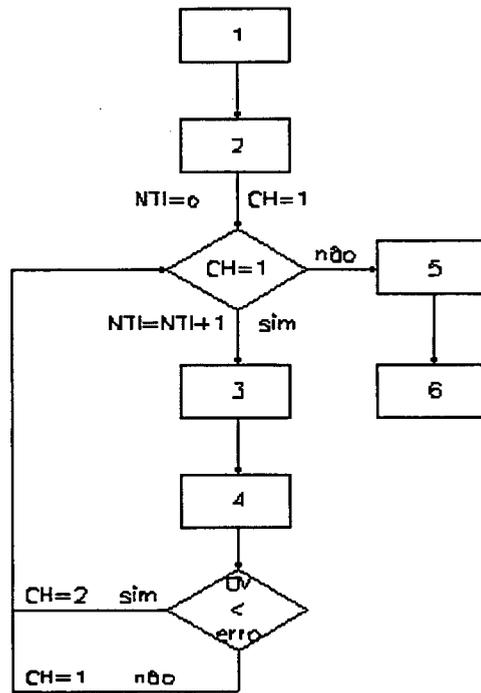


Figura 41 - Fluxograma do Método das Somas de Correntes

Os blocos do fluxograma apresentado na figura 41 têm as seguintes funções computacionais:

Bloco 1 - Leitura dos dados das linhas de distribuição e dos dados de barra.

Bloco 2 - Formação dos seguintes vetores:

BUSUP - vetor que armazena o índice das barras adjacentes superiores a uma barra em questão;

NIVEL - vetor que indica a proximidade de uma barra em questão com a barra de referência.

Outros vetores necessários porém de menos relevância para a implementação do método da Soma das Injeções de de Corrente são apresentados no Apêndice 3.

Bloco 3 - Cálculo das correntes acumuladas em cada nó, partindo-se dos nós de níveis mais altos (mais remoto ao nó de referência). As correntes de cargas são calculadas pelas equações (3.61) e (3.62) para cargas lineares, ou por (2.58) e (2.59) para cargas não-lineares, acumuladas com as correntes da barra vizinha com nível superior ao seu .

Bloco 4 - Correção da tensão das barras de carga. O processamento destas é feito no sentido crescente de nível. Ou seja, primeiramente são corrigidas as tensões das barras adjacentes a barra de referência, pela queda de tensão no elemento de ligação entre as mesmas; em seguida, são corrigidas as tensões das barras adjacentes às barras já processadas, pertencentes aos níveis subsequentes a estas, até que se alcance as barras mais remotas (nível máximo).

Bloco 5 - Cálculo das correntes harmônicas nas barras de cargas não-lineares devido a sua tensão terminal na frequência fundamental após a convergência do processo iterativo, e utilização destas no sistema de equações (3.13). Além disso, são determinadas as condições iniciais para as equações não-lineares (harmônicas) ainda não processadas.

Bloco 6 - Preparação das condições iniciais para o processo iterativo que determina as harmônicas, o qual começa após a convergência do método da soma das injeções de corrente para a frequência fundamental.

Apresenta-se na seção 3.4.2.2 o processo iterativo para a determinação das frequências harmônicas, o que encerra o processo iterativo global para o fluxo de potência harmônico.

3.4.2.2. Processo iterativo harmônico para a solução das tensões harmônicas

Nas frequências harmônicas, o sistema de distribuição mostrado na figura 21 é modelado conforme os modelos apresentados nas seções 2.4 e 3.2. Isto resulta na representação da figura 42.

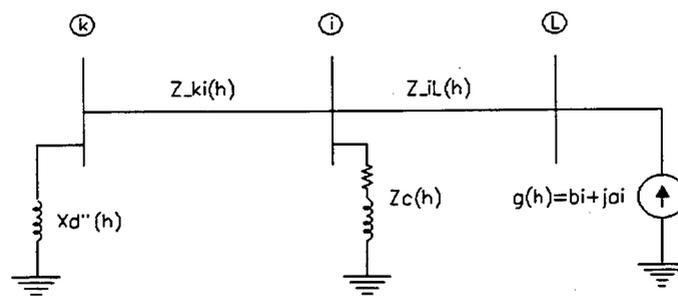


Figura 42 - Sistema de distribuição modelado na frequência h .

Conforme anteriormente descrito, após a convergência das tensões na frequência fundamental, são calculadas as condições iniciais para o processo iterativo de cômputo das harmônicas. Este processo consiste em determinar as tensões harmônicas em todas as barras do sistema por sucessivas soluções do sistema de equações harmônicas (3-13), desenvolvido para cada ordem harmônica de interesse. O algoritmo que descreve esta etapa é apresentado no fluxograma da figura 43.

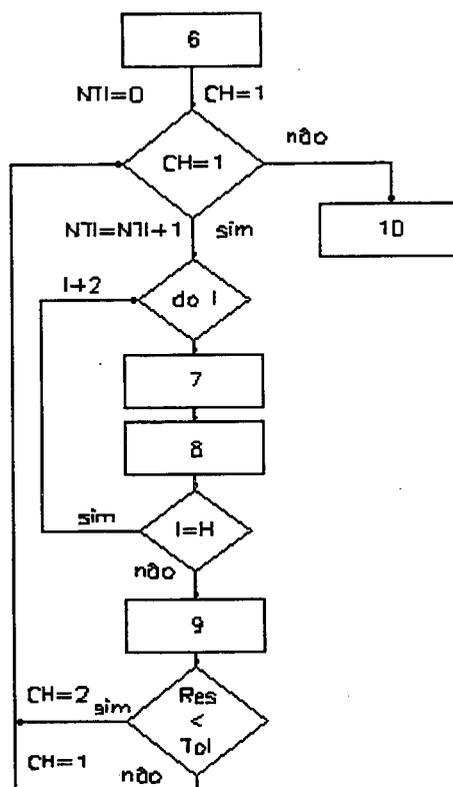


Figura 43 - Fluxograma para a determinação das tensões nas frequências harmônicas .

A enumeração dos blocos da figura 41 segue a seqüência das enumerações dos blocos da figura 43, designando uma seqüência de processamento. Estes blocos cumprem as seguintes tarefas:

Bloco 6 - Estima as condições iniciais para o processo de determinação das harmônicas. Essas condições são determinadas a partir das tensões na frequência fundamental das barras não-lineares;

Bloco 7 - Determinação das partes real e imaginária da corrente nas cargas não-lineares, devido a suas tensões terminais harmônica e fundamental via equações (2.56) a (2.59);

Bloco 8 - As correntes determinadas no bloco 7 são posicionadas (de m até n) nos vetores de injeção de corrente das equações (3.13). Da solução desse sistema de equações são obtidas as tensões harmônicas de ordem H na iteração NTI;

Bloco 9 - Após a execução do laço harmônico (*loop* interno indicado no fluxograma da figura 41), é feito o teste de convergência para todas as tensões harmônicas. O critério é baseado na diferença entre os módulos das tensões harmônicas (h) de duas iterações consecutivas, conforme mencionado anteriormente na seção 3.4.1.

$$\left| \dot{V}_{i(h)}^{(n)} - \dot{V}_{i(h)}^{(n-1)} \right| \leq \varepsilon$$

Bloco10 - Impressão dos dados iniciais e dos resultados. Estes incluem:

- 1- As tensões fundamental e harmônicas para todas as barras do sistema e suas respectivas taxas de distorção;
- 2 - As perdas de potência na transmissão;
- 3 - Despachos de potências na barra de folga e as potências reativas das barras PV.

3.5. Conclusões

A solução das equações não-lineares da rede elétrica considerando a presença de cargas não-lineares, consiste em determinar as tensões complexas em todas as barras do sistema de potência, nas frequências fundamental e harmônicas. A partir dessas grandezas é possível calcular os fluxos de potência nas linhas de transmissão e o despacho de potências ativa e reativa nas barras do sistema.

Para obter esses resultados entretanto, é necessário modelar adequadamente as cargas que causam distorção nas formas de onda de corrente e tensão e os componentes da rede elétrica, assim como reformular os métodos de solução convencionalmente utilizados para a

solução do problema de fluxo de potência.

Uma variedade de tipos de carga produzem tensões e correntes em frequências harmônicas. A ponte retificadora monofásica, freqüentemente utilizada em equipamentos das mais diversas naturezas, é um tipo de carga não-linear. Uma alternativa para a sua modelagem, visando a sua inclusão no conjunto de equações não-lineares do fluxo de potência harmônico, é baseada na decomposição em série de Fourier.

No que diz respeito ao método de solução das equações da rede elétrica, várias abordagens podem ser utilizadas. Tanto o tradicional método de Newton-Raphson como o método da Soma das Injeções de Potência requerem modificações no seu procedimento convencional para a consideração das cargas não-lineares. Alguns dos principais atrativos dessas metodologias são a sua simplicidade, a sua precisão (Newton-Raphson) e a conveniência do seu uso em sistemas radiais (Soma das Injeções de Corrente).

4. Simulações Numéricas

Com base nas formulações apresentadas no capítulo 3, foram implementados em linguagem FORTRAN os métodos de Newton e das Somas das Injeções de Corrente, modificados para levar em conta as cargas não lineares (modeladas conforme mostrado na seção 2.4). Os programas computacionais correspondentes são referenciados no texto a seguir com as seguintes denominações:

FLHAR4 - Programa para a solução do fluxo de potência via método de Newton-Raphson modificado (seção 3.3.1), com especificação das injeções de potência P e Q das cargas não-lineares;

Este programa gera um arquivo de saída com mesmo nome do arquivo de entrada, porém com extensão .HRR;

HARMO - Programa para a solução das equações da rede elétrica através do método de Newton modificado, conforme apresentado na seção 3.3.2, sem especificação das injeções de potência das cargas não-lineares;

Este programa gera um arquivo de saída com extensão .HAR;

FHIC - Programa para a solução do fluxo de carga através do método da Soma das Injeções de Corrente, conforme apresentado na seção 3.4, o qual gera arquivos de saída com extensão .INJ.

Os seguintes dados de entrada são requeridos para os programas desenvolvidos:

- De Linha - os índices das barras nas extremidades de cada linha, sua resistência CC (ohm/km), seu raio geométrico (m), o espaçamento entre os condutores (m), o valor do tape no caso de um transformador com comutação sob carga, a impedância base (ohm) e o comprimento da linha (km);

- De Barra - o índice da barra, o seu tipo (1-folga, 2-PV, 3-PQ e 4-PQNL), o valor da magnitude da tensão (em p.u.), o valor do ângulo das tensões (em radianos), as potências P e Q geradas (em p.u.), as potências P e Q de demanda (em p.u.), a indutância subtransitória do gerador (Henry), a resistência da carga não linear (ohm), e a indutância da carga não-linear (Henry).

O Apêndice D mostra um exemplo do formato do arquivo de entrada de dados com essas características .

Inicialmente, diversas simulações numéricas foram realizadas utilizando os três programas mencionados, para o cálculo de harmônicas em dois sistemas exemplos: um de duas e outro de quatro barras. Os resultados obtidos da aplicação dos métodos implementados foram confrontados e verificadas as suas concordâncias. Também foram feitas comparações entre o número de iterações necessárias para alcançar a solução, quando se partiu de condições iniciais diferentes. Estas simulações são apresentadas na seção a seguir. Ainda com o propósito de avaliar a precisão do fluxo de carga harmônico com relação aos métodos convencionais de solução da rede elétrica, foram realizadas simulações com o método de Newton-Raphson e com o das Somas das Injeções das Correntes em três sistemas. O primeiro com 14 barras, o segundo com 22 barras e o terceiro com 32 barras. Os dados desses sistemas e os seus relatórios de saída são mostrados no apêndice 5.

4.1. Sistema-exemplo de 2 barras

O primeiro sistema utilizado para ilustrar a aplicação da metodologia proposta é constituído por uma barra de geração e uma barra de carga não-linear. A carga é um retificador monofásico de onda completa em ponte com característica resistiva-indutiva ($R=2\text{ ohm}$, $L=0.01H$), previamente modelada na seção 2.4.

O condutor de alimentação , que conecta a geração a carga , é o cabo de alumínio ROSE de 6-AWG, e a distância entre as barras é de 100 metros. A figura 42 mostra o diagrama unifilar deste sistema.

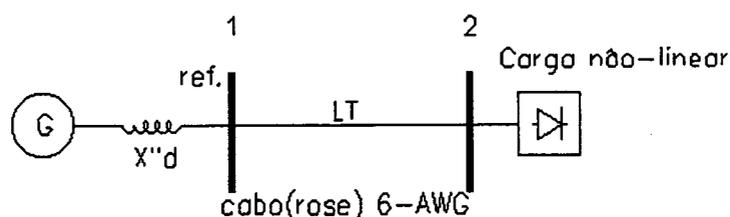


Figura 42 - Sistema exemplo de duas barras.

As quantidades base escolhidas são: potência aparente $S_{base} = 100KVA$ e tensão $V_{base} = 220V$, isto fornece um valor de impedância base $Z_{base} = 0.484\Omega$. As potências e tensões encontradas na solução estão expressas em p.u., nesta base. A dimensão do sistema linear a ser resolvido é $(2n(h+1) - Npv-2)$. Ou seja, a matriz Jacobiana possui dimensão 22×22 na aplicação do método de Newton-Raphson. A tabela 3 mostra os elementos não nulos da matriz Jacobiana (assinalados com x).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3			X	X	X	X																
4	X	X	X	X	X	X																
5			X	X	X	X																
6	X	X	X	X	X	X																
7							X	X	X	X												
8	X	X					X	X	X	X												
9							X	X	X	X												
10	X	X					X	X	X	X												
11											X	X	X	X								
12	X	X									X	X	X	X								
13											X	X	X	X								
14	X	X									X	X	X	X								
15															X	X	X	X				
16	X	X		X		X									X	X	X	X				
17															X	X	X	X				
18	X	X		X		X									X	X	X	X				
19																			X	X	X	X
20	X	X																	X	X	X	X
21																			X	X	X	X
22	X	X																	X	X	X	X

Tabela 3 - Matriz jacobiana para o sistema de duas barras .

[x] - representa a existência de um elemento na matriz Jacobiana;

[] - representa um elemento nulo na matriz Jacobiana.

Partindo-se de condições iniciais pré-calculadas, conforme a tabela 4, para a simulação do sistema de duas barras utilizando os três programas apresentados, obteve-se os resultados (módulo das tensões nas duas barras e seus ângulos em graus), apresentados na tabela 5, nas frequências indicadas.

Foram elaborados dois arquivos de dados para estas simulações. O primeiro é o SIST.DAD para o programa FLHAR, e o segundo, chamado de SIST7.DAD para os programas HARMO e FHIC. O formato dos dados é o mesmo em ambos os arquivos, porém no primeiro são especificadas as potências exatas da carga não-linear, determinados pelo programa HARMO. Estas potências são:

$$P = 0.177036(p.u.) \quad e \quad Q = 0.01828(p.u.)$$

As condições iniciais utilizadas nos programas HARMO e FLHAR4, calculadas conforme apresentado na seção 3.3, estão indicadas na tabela 4.

Condições Iniciais					
Método	Nº da barra	Newton (FLHAR4)		Newton(HARMO)	
		módulo	ângulo	módulo	ângulo
Frequências		$ v $	θ (rad.)	$ v $	θ (rad.)
Fundamental	1	1.045000	0.00000	1.045000	0.00000
	2	0.9511	-0.00860	0.9443	0.01990
3ª harmônica	1	0.000136	-1.42161	0.000135	-1.33606
	2	0.033744	-2.44582	0.033503	-2.36027
5ª harmônica	1	0.000137	-1.50817	0.000136	-1.36558
	2	0.024880	-2.28676	0.024702	-2.14417
7ª harmônica	1	0.000138	-1.55546	0.000137	-1.35585
	2	0.021731	-2.16952	0.021575	-1.96990
9ª harmônica	1	0.000138	-1.58946	0.000137	-1.33281
	2	0.020281	-2.09129	0.020137	-1.83463
11ª harmônica	1	0.000138	-1.61738	0.000137	-1.30369
	2	0.019504	-2.03964	0.019365	-1.72595

Tabela 4 - Condições iniciais pré-calculadas para o método de Newton.

Método	Newton (FLHAR4)	Newton(HARMO)	Soma das C.(FHIC)
Número de I terações	3	4	5

Frequências	N° da barra	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo
		$ v $	θ	$ v $	θ	$ v $	θ
Fundamental	1	1.045000	0.0000°	1.045000	0.0000°	1.0450	0.0000°
	2	0.949452	-0.4441°	0.949490	-0.4442°	0.9495	-0.4442°
3 ^a harmônica	1	0.000123	- 84.171°	0.000123	- 84.171°	0.000123	- 84.172°
	2	0.030599	- 142.85°	0.030601	- 142.85°	0.030601	- 142.85°
5 ^a harmônica	1	0.000124	- 91.149°	0.000124	- 91.149°	0.000124	- 91.149°
	2	0.022505	- 135.75°	0.022507	- 135.75°	0.022506	- 135.76°
7 ^a harmônica	1	0.000124	- 95.820°	0.000124	- 95.820°	0.000124	- 95.819°
	2	0.019581	- 131.00°	0.019583	- 131.00°	0.019583	- 131.00°
9 ^a harmônica	1	0.000129	- 104.68°	0.000129	- 104.68°	0.000129	- 104.68°
	2	0.019042	- 133.43°	0.019045	- 133.43°	0.019044	- 133.44°
11 ^a harmônica	1	0.000123	- 103.43°	0.000123	- 103.43°	0.000123	- 103.21°
	2	0.017374	- 127.38°	0.017378	- 127.38°	0.017389	- 127.41°

Tabela 5 - Convergência dos métodos propostos, com condições iniciais pré-calculadas.

Partindo-se de uma condição inicial, como por exemplo, 1,0 p.u. para o módulo das tensões nas barras de carga e zero radiano para seus ângulos na frequência fundamental; e 0.01 para o módulo das tensões de todas as barras e -1,11 radianos para seus ângulos . Os programas baseados no método de Newton convergiram conforme mostrado na tabela 6.

Método	Newton (FLHAR4)	Newton(HARMO)
Número de Iterações	10	9

Tabela 6 - Número de iteração do método de Newton , para o segundo tipo de inicialização.

Com estas condições iniciais, os programas baseados no método de Newton convergiram para a mesma solução da tabela 5, em um número de iterações maior, como é indicado na tabela 6. A razão disto é que as condições pré-calculadas, como por exemplo as tensões na barra de número dois, fundamental (0.9511) e de terceira harmônica (0.03374), indicadas na tabela 4, estão mais próximas de suas soluções (0.9494) e (0.030599) respectivamente, encontradas na tabela 5, do que as condições iniciais de tensão de 1.0 p.u. para a fundamental e 0.01p.u. para a terceira harmônica. Isto confirma as observações feitas na seção 3.3.

Como um subproduto dos resultados da aplicação desses programas, foram ainda obtidos os valores das potências, valores eficazes da corrente e da tensão e o fator de potência da carga não-linear (barra 2), apresentados na tabela 7 .

V_{ef}	0.9508
I_{ef}	0.2027
$\cos \phi$	0.9186
S	0.1927
P	0.1770
R	0.0761
Q	0.0183
D	0.0739

Tabela 7 - Potências calculadas na barra 2 .

Observando os valores da tabela 7, verifica-se que o valor eficaz da tensão na carga está dentro dos limites, o que não pode ser observado apenas na frequência fundamental pela tabela 5. A potência reativa total (R) é predominantemente de distorção (D) e a carga opera com fator de potência abaixo do valor estabelecido na norma (0.93).

4.2. Sistema-exemplo de 4 barras

Visando demonstrar o efeito das harmônicas geradas pelas cargas não lineares nas barras vizinhas com cargas lineares, apresenta-se um sistema com quatro barras. Este sistema contém: uma barra de geração, uma barra de injeção nula (ou de transferência), uma barra contendo uma carga linear e uma barra contendo uma carga não-linear do tipo descrito na seção 4.1. A figura 43 mostra o diagrama unifilar do sistema de quatro barras.

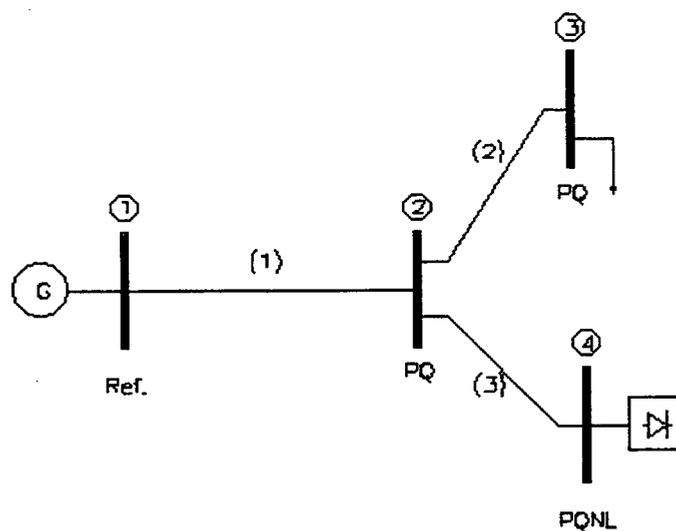


Figura 43 -Sistema com quatro barras .

Primeiramente, foi feita uma simulação utilizando o programa HARMO para determinar as potências ativa e reativa (devido à defasagem entre a tensão e a corrente), na barra de carga não-linear. Neste caso foram determinados os seguintes valores :

$$P_4^{esp} = 0.1703(p.u.) \text{ e } Q_4^{esp} = 0.0167(p.u.)$$

Os valores base de potência e tensão são os mesmos do exemplo da seção 3.1.

A dimensão da matriz Jacobiana do método de Newton neste caso é 46×46 . Os dados deste sistema (arquivo SIST1.DAD) foram processados pelos programas HARMO, FHIC e FLHAR4. As tensões resultantes (fundamental e harmônicas em todas as quatro barras) são apresentadas na tabela 8.

Método	Newton (FLHAR4)	Newton(HARMO)	Soma das C.(FHIC)
Número de I Terações	4	4	8

Frequências	Nº da barra	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo
		$ v $	θ	$ v $	θ	$ v $	θ
Fundamental	1	1.050000	0.0000°	1.050000	0.0000°	1.050000	0.0000°
	2	1.025800	- 0.5683°	1.025798	- 0.5683°	1.025800	- 0.5683°
	3	0.973100	- 0.6003°	0.973114	- 0.6003°	0.973100	- 0.6002°
	4	0.932100	- 1.0128°	0.932044	- 1.0125°	0.932000	- 1.0126°
3ª harmônica	1	0.000118	- 87.655°	0.000118	- 87.654°	0.000118	- 87.670°
	2	0.008272	- 115.68°	0.008272	- 115.68°	0.008273	- 115.70°
	3	0.007842	- 115.76°	0.007842	- 115.76°	0.007840	- 115.83°
	4	0.036870	- 139.57°	0.036869	- 139.57°	0.036870	- 139.57°
5ª harmônica	1	0.000118	- 96.730°	0.000118	- 96.728°	0.000118	- 96.730°
	2	0.007670	- 114.50°	0.007670	- 114.50°	0.007670	- 114.50°
	3	0.007266	- 114.59°	0.007266	- 114.59°	0.007266	- 114.59°
	4	0.028659	- 134.18°	0.028659	- 134.18°	0.028659	- 134.18°
	Nº da barra	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo
7ª harmônica	1	0.000117	- 103.37°	0.000117	- 103.37°	0.000117	- 103.38°
	2	0.007434	- 116.33°	0.007434	- 116.33°	0.007434	- 116.34°
	3	0.007039	- 116.41°	0.007039	- 116.41°	0.007039	- 116.44°
	4	0.025732	- 132.07°	0.025732	- 132.07°	0.025732	- 132.08°
9ª harmônica	1	0.000125	- 114.14°	0.000125	- 114.14°	0.000125	- 114.17°
	2	0.007894	- 124.36°	0.007894	- 124.36°	0.007894	- 124.39°
	3	0.007472	- 124.43°	0.007472	- 124.43°	0.007472	- 124.52°
	4	0.026315	- 137.24°	0.026315	- 137.24°	0.026315	- 137.25°
11ª harmônica	1	0.000114	- 114.51°	0.000114	- 114.51°	0.000114	- 114.52°
	2	0.007148	- 122.97°	0.007148	- 122.97°	0.007148	- 122.97°
	3	0.006765	- 123.03°	0.006765	- 123.03°	0.006765	- 123.04°
	4	0.023337	- 133.78°	0.023337	- 133.78°	0.023337	- 133.78°

Tabela 8 - Resultados das simulações do sistema de quatro barras pelos três métodos.

Comparando-se os resultados obtidos da aplicação dos três métodos, apresentados na tabela 8, verifica-se uma homogeneidade em termos de precisão.

Para ilustrar as discrepâncias no cálculo do fator de potência da carga, do despacho de geração, das perdas nas linhas de transmissão e da magnitude da tensão, provenientes da

aplicação dos métodos convencionais quando comparados àqueles que consideram a não linearidade das cargas, foram feitas simulações numéricas com os sistemas de 14, 22 e 32 barras. Os resultados dessas aplicações são comentados nas seções seguintes.

4.3. Sistema de 14 barras

O sistema de 14 barras, mostrado na figura 44, apresenta três barras de cargas não-lineares: 9, 10 e 13, cujos parâmetros estão indicados na tabela 12.

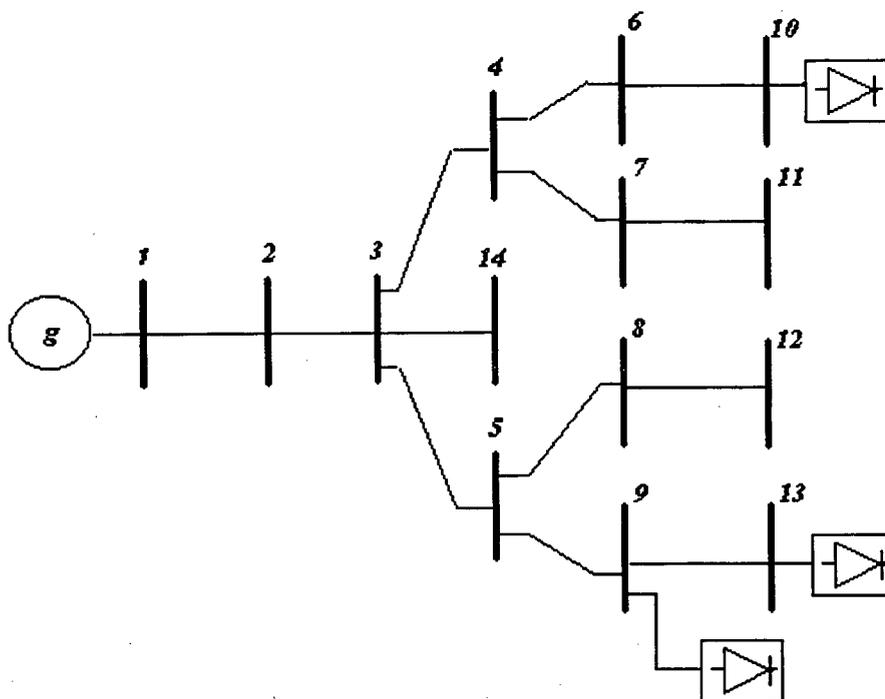


Figura 44- Sistema com 14 barras.

A aplicação dos métodos convencional de Newton-Raphson e o das Soma das Injeções de Corrente, forneceu os resultados indicados nas tabelas 9 e 10 respectivamente. Inicialmente simulou-se o fluxo de carga harmônico via método da Soma das Injeções de Corrente. A partir deste, obteve-se as potências ativas e reativas das barras de cargas não lineares, as quais foram introduzidas como dados de entrada do método convencional de Newton-Raphson. As bases são as supracitadas nos dois casos anteriores.

<i>NB</i>	<i>Tipo</i>	<i>V_{ef}(V)</i>	<i>ang(rad)</i>	<i>P(W)</i>	<i>Q(Var)</i>	<i>S(VA)</i>	<i>FP</i>
1	1	1.0550	00.0000	.4973	.0803	.5037	0.9872
2	3	1.0340	-1.9508	.0300	.0010	.0300	0.9995
3	3	1.0151	-3.8488	.0400	.0001	.0400	1.0000
4	3	1.0068	-4.6838	.0200	.0000	.0200	1.0000
5	3	0.9989	-4.6802	.0200	.0000	.0200	1.0000
6	3	0.9950	-5.0251	.0500	.0080	.0506	0.9875
7	3	1.0042	-4.7147	.0100	.0020	.0102	0.9806
8	3	0.9968	-4.7488	.0100	.0000	.0100	1.0000
9	3	0.9874	-5.0437	.0480	.0020	.0480	0.9991
10	3	0.9874	-5.2720	.0950	.0030	.0950	0.9995
11	3	1.0024	-4.7278	.0180	.0080	.0197	0.9138
12	3	0.9954	-4.7905	.0170	.0010	.0170	0.9983
13	3	0.9797	-5.2898	.0950	.0040	.0951	0.9991
14	3	1.0128	-3.9170	.0210	.0080	.0225	0.9346

Tabela 9- Resultados da simulação no sistema de 14 barras via método convencional de Newton-Raphson.

<i>NB</i>	<i>Tipo</i>	<i>V_{ef}(V)</i>	<i>I_{ef}(A)</i>	<i>P(W)</i>	<i>Q(Var)</i>	<i>S(VA)</i>	<i>FP</i>
1	1	1.0550	.4866	.4987	.0731	.5133	.9716
2	3	1.0351	.0290	.0300	.0010	.0301	.9983
3	3	1.0186	.0395	.0400	.0000	.0402	.9950
4	3	1.0115	.0199	.0200	.0000	.0201	.9928
5	3	1.0138	.0199	.0200	.0000	.0202	.9913
6	3	1.0006	.0510	.0500	.0080	.0510	.9807
7	3	1.0089	.0102	.0100	.0020	.0103	.9755
8	3	1.0116	.0100	.0100	.0000	.0101	.9913
9	4	1.0040	.0528	.0483	.0016	.0530	.9121
10	4	0.9942	.1046	.0949	.0034	.1040	.9121
11	3	1.0071	.0198	.0180	.0084	.0199	.9024
12	3	1.0102	.0171	.0171	.0013	.0173	.9893
13	4	0.9976	.1048	.0953	.0039	.1045	.9118
14	3	1.0163	.0222	.0210	.0080	.0225	.9316

Tabela 10- Resultado do fluxo de carga harmônico para sistema com 14 barras via Soma das Injeções de Corrente.

MÉTODO	NEWTON CONVENCIONAL	FLUXO HARMÔNICO
PERDAS (KWATTS)	2.33431	2.41457

Tabela 11- Perdas de potência ativa na transmissão.

B	THDV(%)	THDI(%)
1	.033	19.247
2	3.488	3.407
3	7.085	7.085
4	8.492	8.492
5	9.383	9.382
6	9.471	6.972
7	8.481	5.644
NB	THDV(%)	THDI(%)
8	9.365	9.365
9	10.935	40.340
10	10.522	40.520
11	8.478	3.616
12	9.347	8.361
13	11.991	40.322
14	7.067	3.400

Tabela 12 - Taxas de distorções da tensão e corrente.

NB	R(ohms)	L(henry)
9	8.0	1.0
10	8.0	1.0
13	4.0	1.0

Tabela 13 - Parâmetros das cargas não lineares.

Comparando as grandezas correspondentes, verifica-se uma diferença entre os valores das magnitudes das tensões, uma vez que o método convencional calcula apenas a tensão na frequência síncrona, enquanto que o método harmônico realiza este cômputo em todas as frequências características da estrutura retificadora, resultando em uma tensão eficaz total formada a partir destas componentes. Os valores de potência aparente obtidos para as cargas lineares são praticamente os mesmos para os dois métodos utilizados. Apenas o fator de potência das cargas lineares calculado pelo método convencional apresentou-se maior do que o calculado pelo método harmônico, pelo fato do primeiro não levar em conta as distorções. Nas barras de cargas lineares onde a taxa de distorção de tensão, verificadas na tabela 12, se encontram abaixo de 8% verificaram-se resultados semelhantes nos cálculos efetuados pelos dois métodos. Porém nas barras de cargas não-lineares (9, 10 e 13), assinaladas por uma tarja cinza nas tabelas 9 e 10, observou-se uma discrepância entre as grandezas calculadas pelos referidos métodos, principalmente nas tensões, nas potências aparentes, com maior evidência no cálculo do fator de potência. Deve novamente ser mencionado que o método de Newton-

Raphson não considera as distorções harmônicas, e portanto as diferenças se amplificaram, pois as barras em questão são as fontes harmônicas no sistema.

Analisado a tabela 12, torna-se evidente que as barras com maior taxa de distorção harmônica de corrente são as de carga não-linear, seguida de suas barras adjacentes com carga linear. As taxas de distorção harmônica de tensão também ocorrem com maior amplitude nas barras de carga linear, dependendo do valor da corrente drenada por elas. Esta corrente depende por sua vez da resistência da carga linear e da distorção da indutância de alisamento, indicadas na tabela 13. Outro fator que influencia a distorção harmônica da tensão é a sua distância da geração. Quanto mais uma barra se distancia da geração maior será a impedância da rede e maior será sua tensão harmônica, sendo este efeito refletido na taxa de distorção harmônica da tensão. As barras de carga linear adjacentes (ou próximas) às barras de carga não-linear, tendem a apresentar taxas de distorção de tensão harmônica altas, porém sua correspondente taxa de distorção harmônica de corrente é atenuada por sua impedância de carga nas frequências harmônicas.

Comparando as perdas de potência ativa na transmissão, mostradas na tabela 11, verifica-se que a perda calculada no caso considerando as harmônicas é levemente superior ao valor calculado via método convencional de Newton-Rapson. Isto pode ser atribuído ao efeito pelicular nos condutores.

4.4. Sistema de 22 barras

O diagrama unifilar do sistema de 22 barras está mostrado na figura 45. Este sistema apresenta duas barras de cargas não-lineares (barras 13 e 21), e seus parâmetros são indicados na tabela 18. Os resultados do fluxo de potência para este sistema, obtidos através dos métodos convencional de Newton-Raphson e harmônico da Soma das Injeções de Corrente, são apresentados nas tabelas 14 e 15 respectivamente.

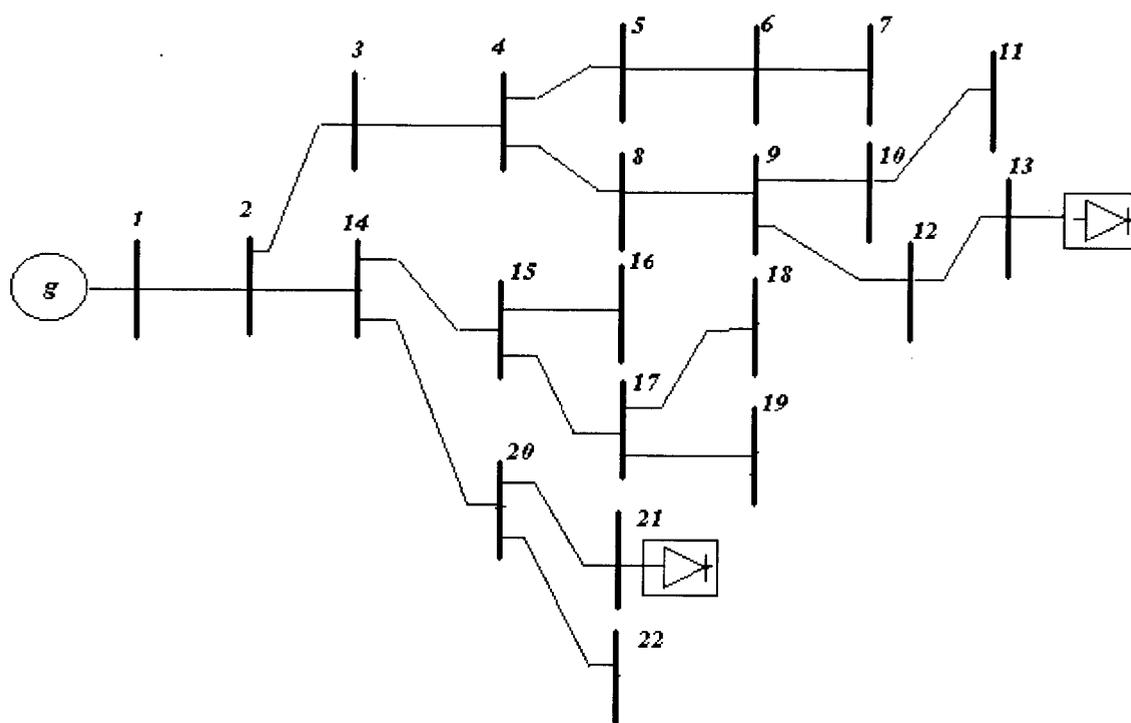


Figura 45 - Sistema com 22 barras

NB	Tipo	$V_{ef}(V)$	$ang(rad)$	$P(W)$	$Q(Var)$	$S(VA)$	FP
1	1	1.0550	00.0000	.7217	.1944	.7474	.9656
2	3	1.0188	-2.7368	.0300	.0010	.0300	.9994
3	3	1.0000	-4.3866	.0400	.0000	.0400	1.0000
4	3	.9832	-5.9096	.0200	.0000	.0200	1.0000
5	3	.9759	-6.2841	.0200	.0000	.0200	1.0000
6	3	.9706	-6.4081	.0500	.0080	.0506	.9874
7	3	.9697	-6.4274	.0100	.0020	.0102	.9806
8	3	.9615	-6.4035	.0100	.0000	.0100	1.0000
9	3	.9407	-6.8899	.0110	.0010	.0110	.9959
10	3	.9365	-6.8667	.0170	.0180	.0248	.6866
11	3	.9346	-6.8817	.0180	.0080	.0197	.9138
12	3	.9250	-7.3901	.0170	.0010	.0170	.9983
13	3	.9109	-7.8575	.1610	.0090	.1613	.9984
14	3	1.0044	-3.8355	.0210	.0080	.0225	.9345
15	3	.9965	-3.8921	.0110	.0010	.0110	.9959
16	3	.9943	-3.8582	.0170	.0180	.0248	.6866
17	3	.9916	-3.9579	.0180	.0080	.0197	.9138
18	3	.9903	-4.0000	.0170	.0010	.0170	.9983
19	3	.9899	-3.9686	.0170	.0080	.0188	.9048
20	3	1.0007	-4.2037	.0210	.0080	.0225	.9345
21	3	.9906	-4.5310	.1270	.0040	.1271	.9995
22	3	.9987	-4.2250	.0210	.0080	.0225	.9345

Tabela 14 - Resultado da simulação do sistema com 22 barras via método convencional de Newton-Raphson .

<i>NB</i>	<i>TIPO</i>	<i>V(pu)</i>	<i>I(A)</i>	<i>P(W)</i>	<i>QVar</i>	<i>D(Var)</i>	<i>S(VA)</i>	<i>FP</i>
1	1	1.0550	0.7181	0.7265	0.1847	0.1098	0.7576	0.9589
2	3	1.0201	0.0295	0.0300	0.0010	0.0016	0.0301	0.9980
3	3	1.0029	0.0400	0.0400	0.0000	0.0035	0.0401	0.9963
4	3	0.9884	0.0204	0.0200	0.0000	0.0024	0.0201	0.9927
5	3	0.9809	0.0205	0.0200	0.0000	0.0024	0.0201	0.9929
6	3	0.9756	0.0522	0.0500	0.0080	0.0053	0.0509	0.9820
7	3	0.9747	0.0105	0.0100	0.0020	0.0010	0.0103	0.9755
8	3	0.9684	0.0104	0.0100	0.0000	0.0015	0.0101	0.9894
9	3	0.9496	0.0116	0.0108	0.0010	0.0018	0.0110	0.9829
10	3	0.9453	0.0267	0.0171	0.0183	0.0032	0.0252	0.6773
11	3	0.9434	0.0212	0.0180	0.0084	0.0026	0.0200	0.8982
12	3	0.9365	0.0186	0.0171	0.0013	0.0033	0.0175	0.9794
13	4	0.9253	0.1916	0.1612	0.0089	0.0731	0.1773	0.9096
14	3	1.0066	0.0224	0.0210	0.0080	0.0014	0.0225	0.9327
15	3	0.9986	0.0109	0.0108	0.0010	0.0008	0.0109	0.9930
16	3	0.9964	0.0252	0.0171	0.0183	0.0015	0.0251	0.6816
17	3	0.9937	0.0200	0.0180	0.0084	0.0012	0.0199	0.9045
18	3	0.9923	0.0173	0.0171	0.0013	0.0013	0.0172	0.9943
19	3	0.9920	0.0192	0.0171	0.0083	0.0012	0.0190	0.8980
20	3	1.0037	0.0224	0.0210	0.0080	0.0017	0.0225	0.9320
21	4	0.9947	0.1401	0.1272	0.0036	0.0568	0.1394	0.9127
22	3	1.0017	0.0225	0.0210	0.0080	0.0017	0.0225	0.9320

Tabela 15- Resultado do fluxo de carga harmônico para sistema com 22 barras via Soma das Injeções de Corrente.

MÉTODO	NEWTON CONVENCIONAL	HARMÔNICO
PERDAS(KWATTS)	4.7726117	5.196354

Tabela 16 - Perdas de potência ativa na transmissão.

NB	THDV(%)	THDI(%)
1	.035	14.642
2	3.796	3.716
3	6.122	6.121
4	8.587	8.586
5	8.471	8.471
6	8.419	6.357
7	8.411	5.744
8	10.353	10.353
9	12.207	10.589
10	12.209	3.471
11	12.204	5.334

NB	THDV(%)	THDI(%)
12	14.152	12.739
13	16.191	37.849
14	5.596	2.778
15	5.579	4.853
16	5.581	1.618
17	5.565	2.486
18	5.555	5.022
19	5.563	2.425
20	6.590	3.271
21	7.969	40.950
22	6.585	3.264

Tabela 17 - Taxas de distorções de tensão e corrente

NB	R(ohms)	L(hemry)
13	2.0	10.0
21	3.0	10.0

Tabela 18 - Parametros das cargas não lineares.

A análise dos resultados obtidos revela que as observações feitas anteriormente também foram verificadas neste caso. Além disto, devido ao maior carregamento do sistema foi possível verificar um aumento nas perdas nas linhas de transmissão com a distorção harmônica, em virtude do efeito pelicular causado pelo aumento da corrente na carga não-linear. Os parâmetros das cargas não-lineares nesta simulação, apresentados na tabela 18, contribuíram para aumentar a corrente no sistema, e por conseguinte as taxas de distorção ao longo do sistema.

É possível ainda, observar nos resultados que a distorção da tensão na barra 13 é maior que a da barra 21. Deve-se isto ao fato da primeira se encontrar mais distante “eletricamente” da geração do que a segunda. Para estas barras, o método convencional de Newton-Raphson não apresentou os mesmos resultados que aqueles calculados via método harmônico das Soma das Injeções de Corrente (as tarjas cinzas nas tabelas 14 e 15 destacam as barras de cargas não-lineares). Nota-se que no cálculo do fator de potência é encontrada uma diferença muito acentuada. Isto poderia, por exemplo, isentar o consumidor das multas por fator de potência abaixo da norma. Assim, sob o ponto de vista da concessionária de energia, se cargas não lineares estão presentes no sistema, esta pode estar deixando de penalizar consumidores, por não empregar medidas adequadas do fator de potência.

Também pode ser observado que nas barras com cargas lineares com taxa de distorção harmônica de tensão inferior a 7%, valores observados na tabela 17, obtiveram-se resultados semelhantes para ambos os métodos simulados, conforme é verificado nas tabelas 14 e 15, para as barras que atendem tal observação.

4.5. Sistema de 32 barras

Neste caso, o diagrama unifilar é aquele apresentado na figura 46. Este sistema contém três barras de cargas não-lineares (barras 13, 21 e 30), e seus parâmetros estão indicados na tabela 23. Os resultados das simulações realizadas com este sistema são mostrados nas tabelas 19 e 20.

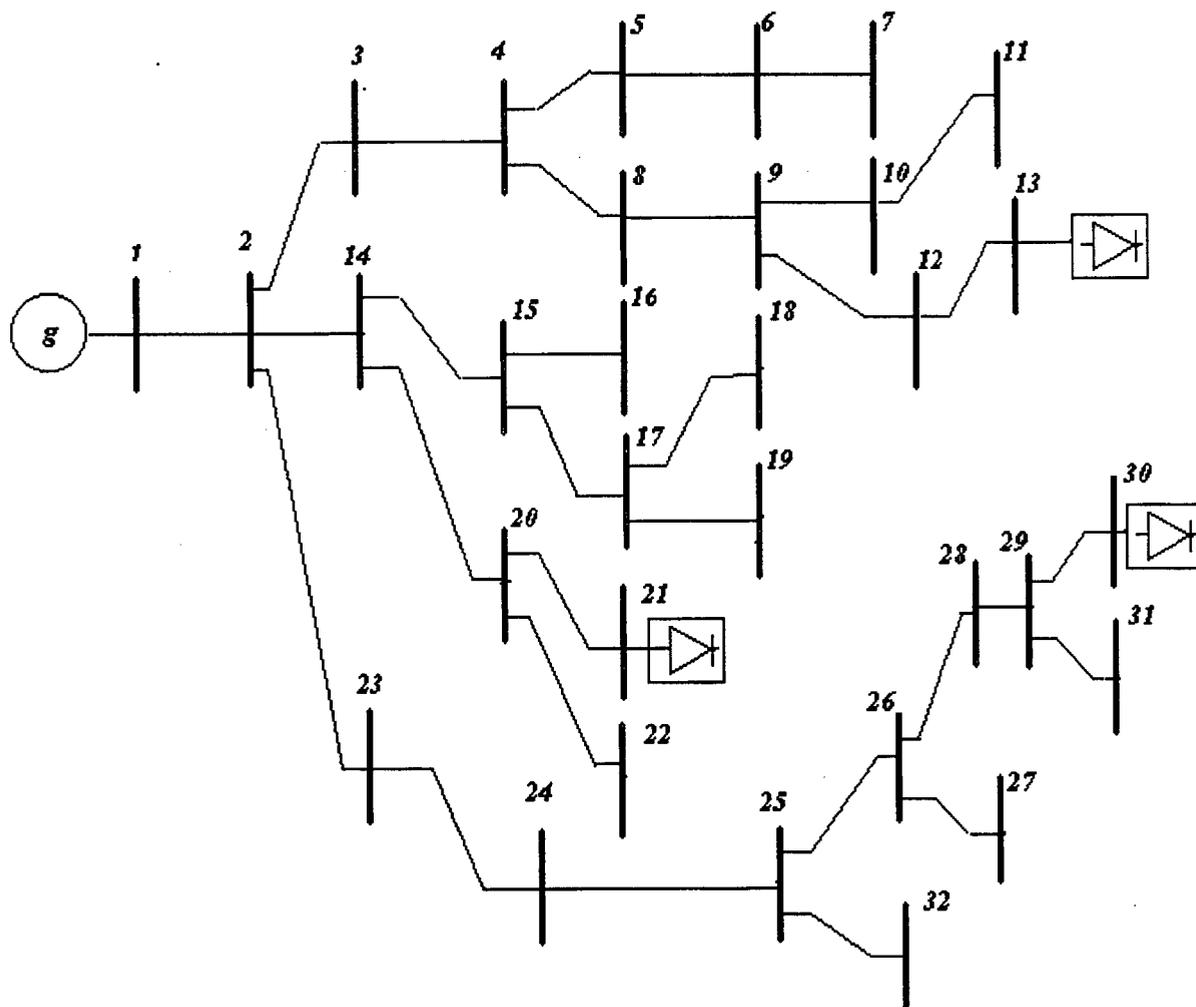


Figura 46 - Sistema com 32 barras

NB	Tipo	$V_{ef}(V)$	$ang(rad)$	$P(W)$	$Q(Var)$	$S(VA)$	FP
1	1	1.0550	.0000	.7272	.2402	.7659	.9495
2	3	1.0152	-2.6893	.0100	.0010	.0101	.9950
3	3	1.0018	-3.8605	.0100	.0000	.0100	1.0000
4	3	.9893	-5.0160	.0200	.0000	.0200	1.0000
5	3	.9811	-5.4385	.0200	.0000	.0200	1.0000

6	3	.9751	-5.5894	.0500	.0080	.0506	.9874
7	3	.9734	-5.6369	.0200	.0020	.0201	.9950
8	3	.9756	-5.3075	.0200	.0000	.0200	1.0000
9	3	.9635	-5.5496	.0210	.0010	.0210	.9989
10	3	.9578	-5.5857	.0270	.0180	.0325	.8321
11	3	.9552	-5.6296	.0280	.0080	.0291	.9615
12	3	.9589	-5.7032	.0170	.0010	.0170	.9983
13	3	.9557	-5.8130	.0390	.0010	.0390	.9997
14	3	1.0023	-3.6249	.0110	.0080	.0136	.8087
15	3	.9904	-3.8176	.0210	.0010	.0210	.9989
16	3	.9874	-3.8107	.0270	.0180	.0325	.8321
17	3	.9832	-3.9673	.0280	.0080	.0291	.9615
18	3	.9818	-4.0102	.0170	.0010	.0170	.9983
19	3	.9799	-4.0341	.0370	.0080	.0379	.9774
20	3	1.0001	-3.8145	.0210	.0080	.0225	.9345
21	3	.9963	-3.9398	.0480	.0010	.0480	.9998
22	3	.9981	-3.8358	.0210	.0080	.0225	.9345
23	3	1.0092	-3.0252	.0170	.0010	.0170	.9983
24	3	.9997	-3.2759	.0170	.0080	.0188	.9049
25	3	.9913	-3.5059	.0110	.0080	.0136	.8088
26	3	.9847	-3.7037	.0110	.0010	.0110	.9959
27	3	.9825	-3.6690	.0170	.0180	.0248	.6866
28	3	.9765	-3.8327	.0180	.0080	.0197	.9138
29	3	.9728	-4.0745	.0170	.0010	.0170	.9983
30	3	.9669	-4.0626	.0410	.0010	.0410	.9997
31	3	.9690	-3.9436	.0110	.0080	.0136	.8087
32	3	.9896	-3.5166	.0170	.0080	.0188	.9048

Tabela 19 - Resultado da simulação do sistema com 32 barras via método convencional de Newton-Raphson.

NB	TIPO	V(pu)	I(A)	P(W)	Q(Var)	D(Var)	S(VA)	FP
1	1	1.0550	0.7276	0.7291	0.2347	0.0512	0.7677	0.9498
2	3	1.0156	0.0099	0.0100	0.0010	0.0002	0.0101	0.9948
3	3	1.0023	0.0100	0.0100	0.0000	0.0003	0.0100	0.9994
4	3	0.9899	0.0202	0.0200	0.0000	0.0009	0.0200	0.9991
5	3	0.9817	0.0204	0.0200	0.0000	0.0008	0.0200	0.9991
6	3	0.9757	0.0519	0.0500	0.0080	0.0019	0.0507	0.9868
7	3	0.9740	0.0207	0.0200	0.0020	0.0008	0.0201	0.9943
8	3	0.9763	0.0205	0.0200	0.0000	0.0010	0.0200	0.9988
9	3	0.9643	0.0216	0.0208	0.0010	0.0011	0.0209	0.9974
10	3	0.9585	0.0341	0.0271	0.0183	0.0014	0.0327	0.8280
11	3	0.9559	0.0306	0.0280	0.0084	0.0013	0.0293	0.9569
12	3	0.9598	0.0179	0.0171	0.0013	0.0010	0.0172	0.9954
13	4	0.9568	0.0453	0.0396	0.0007	0.0175	0.0433	0.9142
14	3	1.0028	0.0136	0.0110	0.0080	0.0004	0.0136	0.8085

16	3	0.9879	0.0331	0.0271	0.0183	0.0009	0.0327	0.8284
17	3	0.9835	0.0297	0.0280	0.0084	0.0009	0.0292	0.9574
18	3	0.9821	0.0175	0.0171	0.0013	0.0006	0.0172	0.9965
19	3	0.9802	0.0388	0.0371	0.0083	0.0012	0.0380	0.9754
20	3	1.0008	0.0225	0.0210	0.0080	0.0008	0.0225	0.9340
21	4	0.9972	0.0532	0.0485	0.0007	0.0214	0.0530	0.9148
22	3	0.9988	0.0225	0.0210	0.0080	0.0008	0.0225	0.9340
23	3	1.0100	0.0170	0.0171	0.0013	0.0005	0.0172	0.9967
24	3	1.0009	0.0190	0.0171	0.0083	0.0005	0.0190	0.8993
25	3	0.9928	0.0137	0.0110	0.0080	0.0004	0.0136	0.8083
26	3	0.9867	0.0110	0.0108	0.0010	0.0005	0.0109	0.9948
27	3	0.9844	0.0255	0.0171	0.0183	0.0009	0.0251	0.6823
28	3	0.9791	0.0203	0.0180	0.0084	0.0008	0.0199	0.9054
29	3	0.9733	0.0176	0.0171	0.0013	0.0010	0.0172	0.9955
30	4	0.9703	0.0459	0.0407	0.0007	0.0180	0.0445	0.9143
31	3	0.9720	0.0140	0.0110	0.0080	0.0006	0.0136	0.8079
32	3	0.9911	0.0192	0.0171	0.0083	0.0006	0.0190	0.8992

Tabela 20 - Resultado da simulação feita com o sistema de 32 barras via método harmônico das Somas das injeções das correntes.

MÉTODO	NEWTON CONVENCIONAL	HARMÔNICO
PERDAS(KWATTS)	3.72364	3.78766

Tabela 21 - Perdas de potência ativa nas Linhas de transmissão.

NB	THDV(%)	THDI(%)
1	.017	6.678
2	1.873	1.579
3	2.442	2.442
4	3.040	3.040
5	2.989	2.989
6	2.966	2.217
7	2.959	2.513
8	3.474	3.474
9	3.921	3.737
10	3.914	1.359
11	3.907	2.169
12	4.390	3.934
13	4.873	42.449
14	2.623	.865
15	2.601	2.477
16	2.601	.897

NB	THDV(%)	THDI(%)
17	2.583	1.421
18	2.578	2.312
19	2.575	1.646
20	3.035	1.448
21	3.577	42.930
22	3.033	1.447
23	2.195	1.965
24	2.575	1.073
25	2.964	.976
26	3.361	2.883
27	3.363	.923
28	3.823	1.616
29	4.293	3.841
30	4.777	42.524
31	4.294	1.410
32	2.963	1.230

Tabela 22- Taxas de distorções das tensões e correntes

NB	R(ohms)	L(henry)
13	9.0	100.0
21	8.0	100.0
30	9.0	100.0

Tabela 23 - resistência e indutância da carga não linear.

Neste caso, novamente é observada uma diferença no cálculo do fator de potência das cargas não-lineares (destacadas por tarjas cinzas nas tabelas 19 e 20), resultante da não consideração das distorções harmônicas.

Por sua vez, os valores de perda observados na tabela 21 são semelhantes, em virtude do baixo carregamento e da baixa distorção das tensões ao longo do sistema. Isto tornou também os resultados das tabelas 19 e 20 muito semelhantes, excetuando-se as barras de cargas não lineares pela razão anteriormente mencionada. Da tabela 22, nas barras 2, 14 e 31, onde as taxas de distorção de corrente são menores que 2%, verifica-se observando-se as tabelas 19 e 20, que os resultados obtidos pelos métodos utilizados são semelhantes. Isto permite verificar que os resultados do método convencional de Newton-Raphson na presença de cargas não-lineares são confiáveis apenas para as cargas lineares convencionais quando as taxas de distorções de tensão estão abaixo de 5%. Por outro lado, este método é inadequado para as cargas não-lineares e também para o despacho da geração.

As taxas de distorção harmônica das tensões, indicadas na tabela 22, são reduzidas devido ao fato das correntes nas barras de cargas não-lineares serem menores que a dos casos anteriores, pois a resistências de cargas são maiores, como mostra a tabela 23. As distorções de corrente nas cargas não-lineares também são maiores que nos casos anteriores, uma vez que a sua indutância de alisamento é elevada.

Apesar da corrente das barras de cargas não-lineares serem menores que as dos casos anteriores, a diferença de cálculo do fator de potência da carga entre os dois métodos escolhidos continua gritante, alertando a necessidade da reformulação para o cálculo desta grandeza.

4.6. Conclusões

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de solução das equações da rede elétrica em regime permanente, Newton-Raphson modificado e Soma das Injeções de Corrente, forneceram resultados com o mesmo grau de precisão.

O pré-cálculo das condições iniciais no estudo do fluxo de potência harmônico reduz o número de iterações do processo computacional, acelerando a convergência do método.

Diferentes resultados no que diz respeito à tensão, potência aparente, fator de potência e perdas, foram obtidos nas simulações realizadas com os três sistemas teste utilizados neste trabalho, utilizando os métodos de Newton-Raphson convencional e o das Somas das Injeções de Corrente. Atribui-se isto ao fato do primeiro não levar em conta a distorção da forma de onda nas correntes e tensões do sistema de potência.

A despeito dessas diferenças entretanto, quando as taxas de distorções harmônicas de tensão (THDV) para as cargas lineares estão abaixo de 5%, os resultados da aplicação desses métodos são semelhantes, o que vem a explicar o emprego da norma recomendada pelo GCOI.

A taxa de distorção harmônica das correntes depende da amplitude da tensão nos terminais da carga não-linear e dos valores de sua resistência e indutância de alisamento. Com relação às cargas lineares, esta taxa depende da localização da barra em questão com relação as barras de cargas não-lineares.

A proximidade entre uma barra de carga e uma barra de geração faz com que haja uma tendência de redução na taxa de distorção harmônica da tensão. A razão disto é o fato desta última impor sua tensão senoidal em barras eletricamente próximas.

O aumento da perda de potência ativa nas linhas de transmissão está associado ao carregamento da rede elétrica e também ao nível de distorção ao longo do sistema. Ambos os fatores podem acentuar o efeito pelicular nos condutores de energia.

A consideração de componentes das tensões e correntes, que apresentem distorções da forma de onda senoidal, devem ser considerados para a formação do tetraedro de potências, cujas arestas são as potências envolvidas nos estudos de fluxo de carga harmônico.

5. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

Visou-se neste trabalho o estudo de uma metodologia de análise da operação dos sistemas de energia elétrica, em situações onde as formas de onda da tensão e corrente apresentam-se distorcidas. A abordagem mostrada consiste em modelar as características das cargas não lineares, para que seus efeitos sejam considerados nos algoritmos de solução do fluxo de potência. Apresentou-se uma forma de tratamento matemático para avaliação das distorções na tensão oriundas das cargas não-lineares ao longo do sistema de potência.

Como principais contribuições deste trabalho pode-se destacar:

— O estudo da representação de um tipo de carga não-linear para inclusão nos algoritmos de solução das equações da rede elétrica.

A modelagem da carga apresentada na seção 2.2 permitiu o estudo realizado no Apêndice 1. Neste foi verificado que o aumento da indutância de alisamento da carga provoca uma forma de onda quadrada na corrente, aumentando as amplitudes das correntes harmônicas e reduzindo o fator de potência da carga. Também foi observado que a potência aparente é dividida em três termos ortogonais (P,Q e D).

— O estudo da representação das cargas lineares na presença de ondas harmônicas.

Nas frequências harmônicas as cargas lineares são modeladas como admitâncias ligadas a terra, e portanto adicionadas aos elementos diagonais da matriz de admitâncias de barra. As potências ativas e reativas (P e Q) são apenas determinadas pela tensão e corrente na frequência fundamental .

— O estudo dos algoritmos utilizados na solução das equações não lineares da rede elétrica e sua adaptação para considerar cargas modeladas de diferentes maneiras.

Os métodos numéricos utilizados para resolver as equações de balanço de corrente na frequência fundamental são mais flexíveis às variações impostas pela operação. Por outro lado, os que utilizam as equações de balanço de potência precisam das especificações das potências da carga não-linear.

— O desenvolvimento de programas computacionais para a solução do fluxo de potência considerando cargas não lineares e análise de resultados obtidos com estes programas.

Com relação aos resultados numéricos mostrados no capítulo anterior, são feitos os comentários a seguir.

Os programas desenvolvidos em FORTRAN, referenciados neste trabalho como HARMO, FLHAR4 e FHIC, apresentaram comportamento semelhante quanto à precisão dos resultados obtidos para os casos simulados.

No caso do método da Soma das Injeções de Corrente (programa FHIC), não é prevista a possibilidade da existência de mais do que uma barra de geração e nem a formação de malhas ao longo do sistema.

O pré-cálculo das harmônicas utilizado na inicialização das variáveis dos métodos implementados resultou numa redução do número iterações para a convergência do processo.

A vantagem do programa FHIC sobre os demais é que neste não são calculadas as derivadas parciais necessárias para a formação da matriz Jacobiana. Além disso, as matrizes envolvidas na solução das equações tem no caso deste método, dimensões da ordem $2N$, enquanto que no método de Newton a matriz Jacobiana possui dimensão $2N(h+1)-NPV-2$.

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se citar as seguintes:

Os programas implementados requerem rotinas que selecionem o tipo de não linearidade das cargas, e que calculem os respectivos coeficientes de Fourier para cada modelo encontrado. A obtenção dos coeficientes de Fourier na etapa de modelagem da carga é

uma tarefa árdua que envolve integrais com razoável grau de complexidade e que requer ainda várias simplificações. Porém com o programa WINMAPLE, por exemplo, é possível uma considerável redução no esforço computacional. Outros modelos de cargas devem ser incluídos no programa desenvolvido, tornando-o mais flexível quanto às possíveis cargas não-lineares encontradas na rede.

A modelagem trifásica também deve ser implementada, pois as estruturas retificadoras trifásicas operando em situações de desequilíbrio, geram também correntes harmônicas não características.

Resultados obtidos através das simulações devem ser confrontados com medições de campo, para confirmar sua precisão. Neste ponto deve-se ressaltar que a correta representação no domínio da frequência das cargas lineares e dos demais elementos do sistemas são os que definem as tensões harmônicas encontradas nas barras do sistema.

Devido à grande dimensão e ao alto grau de esparsidade da matriz Jacobiana, a aplicação da técnica de armazenamento por listas encadeadas é recomendada nos programas implementados.

No método da Soma das Injeções de Corrente pode-se usar as técnicas de processamento paralelo para as iterações harmônicas. A utilização de um pré-condicionador na matriz de admitâncias de barras pode acelerar a convergência .

Apêndice A

Retificador Monofásico com Carga R-L

A.1 Exemplo Numérico

Considere o circuito da Fig. A.1-1 .

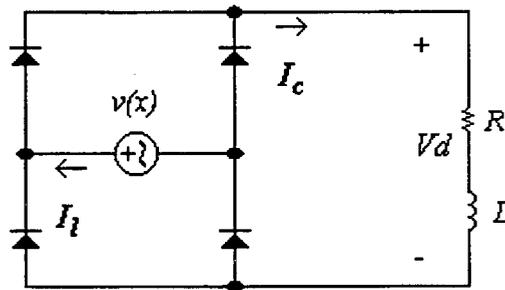


Figura A.1 -1 - Circuito da ponte retificadora monofásica a diodos.

onde,

$$v(x) = 300.\sin(x)$$

$$L = 10H$$

$$R = 2k\Omega$$

$$x = 377.t$$

$$w = 377rad / seg.$$

$$f_0 = 60.hz$$

Supondo que a fonte de alimentação seja ideal, que a impedância dos condutores que liga a fonte a estrutura retificadora seja nula, que os retificadores sejam ideais e desprezando o efeito da comutação. A série de Fourier da forma de onda de tensão na carga é expressa como,

$$V_d = 2.V_p / \pi + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{4.V_p.\cos(n.x)}{\pi.(1-n^2)} \quad (A.1-1)$$

onde, $V_0 = 2.V_p / \pi$ é o valor médio da tensão na carga , e também seria o valor da tensão na carga resistiva caso a indutância L fosse muito grande.

Substituindo os valores especificados obtém-se:

$$Vd = 191.0828 - 127.38 \cdot \cos(2 \cdot x) - 25.47707 \cdot \cos(4 \cdot x) - 10.919 \cdot \cos(6 \cdot x) - 6.066 \cdot \cos(8 \cdot x) - 3.86025 \cdot \cos(10 \cdot x) \dots$$

Porém,

$$Vd = |v(x)| = |300 \cdot \sin(x)| \quad (A.1-2)$$

O gráfico de Vd baseado nas equações (A.1-1) e (A.1-2), e com a série de Vd truncada em $n = 10$, é mostrado na figura A.1-2. Nesta figura, a curva em preto corresponde a série de Fourier da tensão Vd (equação (A.1-1) com seis termos), e a curva em vermelho corresponde a função módulo de $v(x)$ (equação (A.1-2)).

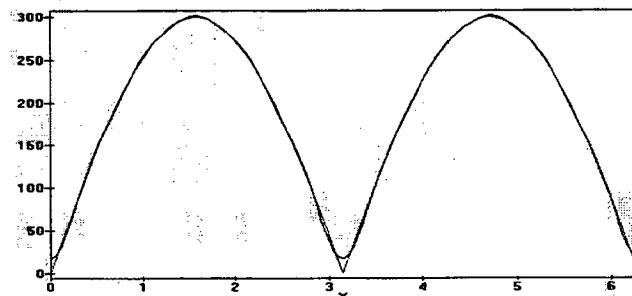


Figura A.1 -2 - Forma de onda da tensão na carga.

Observando a expressão da tensão na carga, verifica-se que só existem tensões de frequência múltipla par (0, 2, 4, 6 ...). Para achar a série da corrente na carga, calcula-se a impedância da carga para cada uma destas frequências e, aplicando o princípio da superposição, divide-se cada uma das tensões harmônicas fasoriais pela impedância calculada na frequência correspondente.

A tabela A.1 apresentada a seguir, mostra o valor da impedância para cada frequência desejada:

n	n.w	R	n.w.L	[Z]	θ°
0	0	2k	0	2k	0°
1	377	2k	3.77k	4.26k	62°
2	754	2k	7.54k	7.78k	75.1°
4	1508	2k	15.08k	15.2k	82.45°
6	2262	2k	22.62k	22.7k	84.92°

Tabela A.1- Impedância da carga vs. frequência.

A série da corrente na carga é

$$I_d = 0.09554 - 0.01637.\cos(2.x - 1.31007) - 0.001676.\cos(4.x - 1.438).....$$

Observe-se que o termo constante da última expressão foi calculado dividindo-se a equação (A.1-1) por R, e que o produto de I_o por V_o resulta a potência média na carga, ou seja, a referência de potência ativa .

Para a determinação da corrente na carga pode-se usar outro procedimento, conforme descrito na seção 2.4, o qual é usado durante o processo iterativo do fluxo de potência harmônico e cuja apresentação será feita nas linhas subsequentes.

Como foi visto na seção 2.4, utiliza-se a fórmula (2.50) para determinar a constante k da expressão da corrente (2.40), isto é

$$i(n.\omega.t) = A.\sin(n.\omega.t + b - \alpha) + k.e^{-\frac{(n.\omega.t+b)}{n.\omega.\tau}}$$

Substituindo os valores fornecidos anteriormente , obtém-se:

$$i(x) = 0.070296.\sin(x - 1.083044) + k.e^{-.5305.x}$$

*obs. n = 1 e b = 0.0 (rad)

Após a aplicação das fórmulas (2.50) e (2.51), obtém-se o seguinte valor para a constante k e para $i(0)$:

$$k = 0.1531922$$

e

$$i(0) = 0.09111$$

A corrente na carga é periódica, de período π , e a expressão obtida acima é válida para todos os intervalos, devendo-se apenas fazer o deslocamento em x da função acima para o intervalo desejado. Sua expressão em regime permanente é

$$i(x) = 0.070296.\sin(x - 1.083044) + 0.1531922.e^{-.5305.x}$$

Plotando estas duas curvas para o intervalo $0 \leq x \leq \pi$, obtém-se a figura A.1-3. Nesta figura:

- a curva em preto que foi traçada pela série de corrente (I_d);
- a curva em vermelho pela exponencial. ($i(x)$).

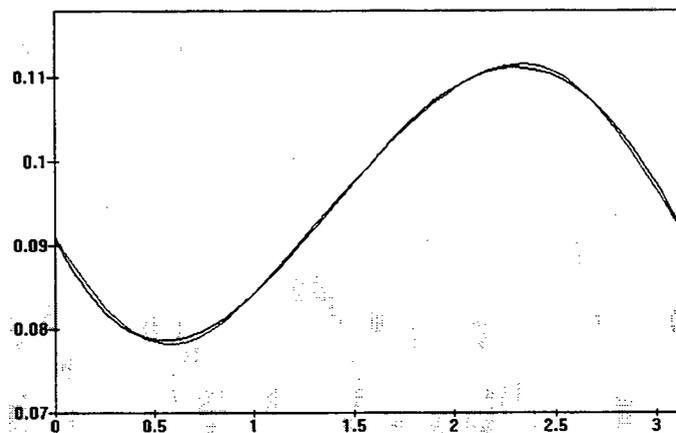


Figura A.1- 3 - Forma de onda da corrente na carga .

O objetivo destes cálculos foi verificar que a expressão analítica da corrente na carga está de acordo com aquela obtida através da série de Fourier.

Uma vez determinada esta expressão, pode-se expressar a série de Fourier da corrente na linha, a qual traduzirá o efeito da carga não linear para o sistema de corrente alternada.

Assim, da expressão

$$i(x) = 0.070296.\sin(x - 1.083044) + 0.1531922.e^{-.5305.x}$$

pode-se retirar as seguintes constantes:

$$\begin{aligned}\omega.\tau &= 1.885 \\ A &= 0.070296 \\ \alpha l z &= 1.083044(\text{rad}) \\ k &= 0.1531922 \\ n &= 1 \\ b &= 0.0(\text{rad})\end{aligned}$$

as quais serão substituídas nas formulas (2.56) a (2.59) para o cálculo dos coeficientes de Fourier no caso da corrente na linha.

Após o cálculo destes coeficientes e da composição destes pares em um seno chega-se à seguinte expressão para a corrente na linha para a carga não linear da figura 1:

$$\begin{aligned}I_l(x) &= 0.12422.\sin(x - 0.11380078) + 0.038056.\sin(3.x + 0.1748) \\ &+ 0.02305.\sin(5.x + 0.10533) + 0.01651.\sin(7.x + 0.07512)\dots\dots\end{aligned}$$

Na figura A.1-4 pode-se notar a precisão e a validade do método empregado. Quando é aumentado o número de termos, verifica-se uma maior aproximação da série com as assíntotas. Pela expressão acima verifica-se que a corrente na linha é composta por uma componente fundamental somada a várias componentes harmônicas, cujas amplitudes diminuem tanto quanto maiores forem suas ordens. Isto sugere um truncamento em uma determinada ordem, para que se possa estudar o efeito de propagação das componentes mais relevantes.

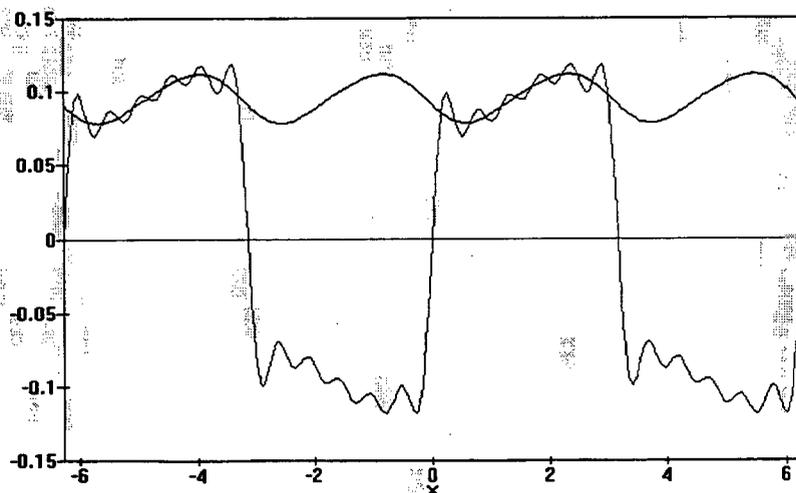


Figura A.1-4 - Forma de onda da corrente na linha

Devido a estas características, optou-se por truncar a série no termo de 11ª ordem , uma vez que os termos acima deste, contribuirão com injeções menores que 7% da fundamental.

Observando-se ainda que quanto maior for a indutância L (Indutância de alisamento da corrente) maiores serão as amplitudes das correntes harmônicas (3, 5 ,7...) no lado da linha, pois a indutância diminuirá a ondulação da corrente harmônica (2, 4, 6...) no lado da carga, esta conhecida como corrente de “ ripple “.

Apresenta-se a seguir um estudo sobre a potência em uma carga genérica. São introduzidas durante este estudo, definições úteis para a elaboração do método modificado do algoritmo de Newton , para solução da equação não linear, no tratamento deste tipo de carga.

1. Inicialmente , supondo-se que a carga da figura A.1-1 está submetida diretamente à tensão de alimentação sem a estrutura retificadora. Desta maneira é possível aplicar a análise fasorial diretamente e obtendo-se as seguintes potências:

$$\begin{aligned}
 V &= v_{ef} \angle 0^\circ = 300 / \sqrt{2} \cdot \angle 0^\circ \\
 Z &= 2000 + j3770 \\
 I &= V / Z = 4.97 \times 10^{-2} \cdot \angle -62.053^\circ \\
 S &= V \cdot I^* = 4.94155 + j9.3148 \\
 \cos \phi &= 0.4684
 \end{aligned}$$

2. A análise do circuito da figura A.1-1, através das expressões da corrente e tensão no lado CA, é feita a seguir .

A partir das definições da seção 2.1.2 equações (2.15) a (2.21), pode-se determinar as potências envolvidas no circuito da figura 1.

A série de Fourier de corrente no lado da linha é:

$$\begin{aligned}
 I_l(x) &= 0.12422 \cdot \sin(x - 0.11380078) + 0.038056 \cdot \sin(3 \cdot x + 0.1748) \\
 &+ 0.02305 \cdot \sin(5 \cdot x + 0.10533) + 0.01651 \cdot \sin(7 \cdot x + 0.07512) \dots\dots
 \end{aligned}$$

E a tensão na entrada do retificador é:

$$v(x) = 300 \cdot \sin(x)$$

Calculando os valores eficazes da tensão e corrente, e as potências através das fórmulas(2.11 e 2.22) , obtém-se

$$I_{rms} = 0.09513 - A$$

$$V_{rms} = 212.21 - V$$

$$S = I_{rms} \times V_{rms} = 20.18 - VA$$

$$P = 18.51322 - W$$

$$Q = 2.1161 - VAR$$

$$|P + jQ| = 18.633 \neq |S|$$

$$\cos(\phi_1) = \cos(0.11380078) = 0.9935...(\text{fundamental})$$

$$\cos(\phi) = P / S = 0.91739.....(\text{real})$$

$$\phi = \text{arc.cos}(0.91739) = 23.4519^\circ$$

$$R = S \cdot \sin(\phi) = 8.03133..VAR$$

$$D = \sqrt{R^2 - Q^2} = 7.74752..VAR$$

ou..alternativamente.:

$$D = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{I_1}{I_{rms}}\right)} = 7.7475$$

As conclusões que se pode tirar destes dois exemplos são as seguintes:

1.Comparando , o módulo da corrente do caso 2 com a do caso 1, nota-se que a mesma é quase o dobro da do caso 1. Naturalmente, deve ser observado que os dois circuitos são diferentes. No primeiro, a impedância é aplicada diretamente à fonte alternada, aparecendo o efeito da reatância indutiva na diminuição do módulo da corrente e um fator de potência baixo. Já no segundo caso, a carga propriamente dita seria R e a indutância tem o papel de diminuir a ondulação da corrente na carga. O que praticamente limita a corrente é a resistência de carga, e por isto a corrente é quase o dobro daquela do caso 1, e o fator de potência é maior, pois este é coseno do ângulo da carga .

2. No segundo caso, que é o de maior interesse neste trabalho, verifica-se que o fator de potência medido pela forma convencional na frequência fundamental é maior que o real.

3. A potência aparente não é mais formada apenas pelos dois termos P e Q, porém possui uma parcela adicional que representa a potência de distorção harmônica D.

4. A fórmula alternativa para calcular D é válida apenas no caso onde a tensão é isenta de harmônicos.

5. As harmônicas tendem a baixar o fator de potência da carga.

A.2. Peculiaridades da carga RL

A seguir, com o objetivo de analisar a resposta do conteúdo harmônico da corrente na carga e na linha, e de todas as potências relacionadas a este tipo de demanda, um estudo é feito sobre a variação dos parâmetros da carga RL.

A carga alimentada pelo retificador consiste de uma resistência equivalente R vista dos terminais da entrada de um circuito eletrônico qualquer. A indutância L é responsável pelo “alisamento” da corrente e conseqüentemente da tensão em R. A indutância tem então a função de diminuir o “ripple” da forma de onda da corrente na carga. Isto é conseguido pela seguinte análise mostrada a seguir .

1-Da expressão da corrente na carga

$$I_c = A.\sin(x - \alpha) + k.e^{-\alpha.x}$$

Aumentando o valor da indutância L , aumenta-se também o valor de ωL na frequência fundamental. Conseqüentemente, eleva-se o módulo da impedância $Z = (R + j\omega L)$. Além disto, o coeficiente α da exponencial diminui e A , o módulo da tensão de alimentação dividido pelo módulo de Z , também diminui tendendo ambos a zero quando L tende a infinito .

Verifica-se que k tenderá a I_o , o valor médio da corrente na carga, como resultado do aumento em L , conforme mostram os estudos dos casos a seguir. Da substituição dos valores de $A = 0,0$ e $\alpha = 0,0$ na expressão de I_c quando $L \xrightarrow{\text{tendendo}} \infty$, obtém-se:

$$I_c \approx I_o \text{ para } L \text{ elevado.}$$

2- Alternativamente, da expressão para a corrente na carga

$$I_c = 2.V_p / R\pi + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{4.V_p \cdot \cos(n.x)}{\pi \cdot (1-n^2) \cdot |Z(n.\omega)|}$$

Com o aumento de L , o módulo da impedância $|Z(n.\omega)|$ eleva-se para cada ordem harmônica (2, 4, 6...), atenuando assim o “ripple” da forma de onda da corrente na carga, pois os termos do somatório tendem a desaparecer com L muito grande. Novamente tem-se

$$I_c \approx I_o \approx 2.V_p / R.\pi \text{ , para } L \text{ muito grande.}$$

Desta forma, a potência ativa exigida pela carga tenderá a

$$P_o = \left(\frac{2.V_p}{\pi}\right)^2 \div R$$

a qual para o caso base vale

$$P_o = 18,2378.W$$

Através do circuito do caso base (figura A.1-1), realizam-se estudos primeiramente da variação da indutância, e em seguida, da resistência de carga, sendo esta que define a potência média na carga.

A.2.1. Variação de L

Variou-se a indutância L entre $0,01H$ a $100,0H$, e através das fórmulas (2.40) a (2.59) determinou-se as expressões da corrente no lado da carga e na linha. A seguir estão ilustrados alguns casos:

1- Para $L=0,01H$ e $R=2,0K\Omega$

$$I_c(x) = 0,1499997 \times \sin(x - 0,000188) + 0,00056 \times e^{-530,516x}$$

$$I_l(x) = 0,1499997 \times \sin(x - 0,00188) + 0,67857 \times 10^{-6} \times \sin(3.x + 1,565) + 0,67855 \times 10^{-6} \times \sin(5.x + 1,56137) + \dots$$

2- Para $L=1,0H$ e $R=2,0K\Omega$

$$I_c(x) = 0,1474 \sin(x - 0,08638) + 0,0546 \times e^{-5,30516x}$$

$$I_l(x) = 0,1475447 \times \sin(x - 0,14265) + 0,005704 \times \sin(3.x + 1,565) + 0,0047688 \times \sin(5.x + 0,815) + \dots$$

3- Para $L=100,0H$ e $R=2,0K\Omega$

$$I_c(x) = 0,007946 \times \sin(x - 1,51779) + 0,10338 \times e^{-0,0530516x}$$

$$I_l(x) = 0,1216139 \times \sin(x - 0,012387) + 0,0405019 \times \sin(3.x + 0,01768) + 0,0243 \times \sin(5.x + 0,0106099) + \dots$$

Para estas expressões, foram plotados os correspondentes gráficos juntamente com as expressões do caso base, para possibilitar a análise da variação da corrente na carga com a variação de L .

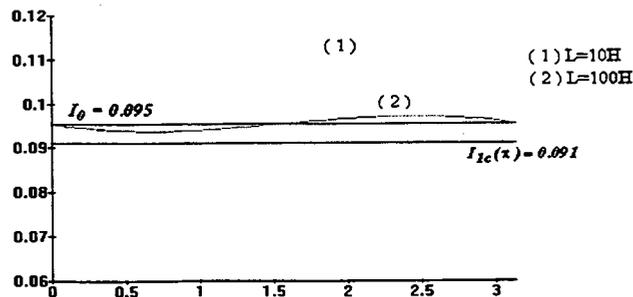


Figura A.1-5. Forma de onda da corrente na carga.

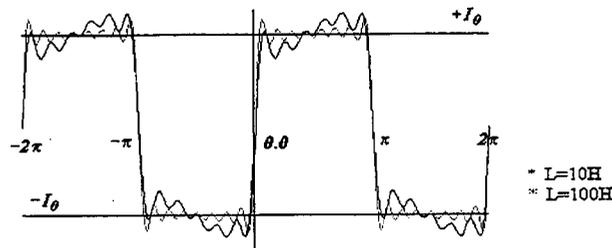


Figura A.1-6. Forma de onda de corrente na linha.

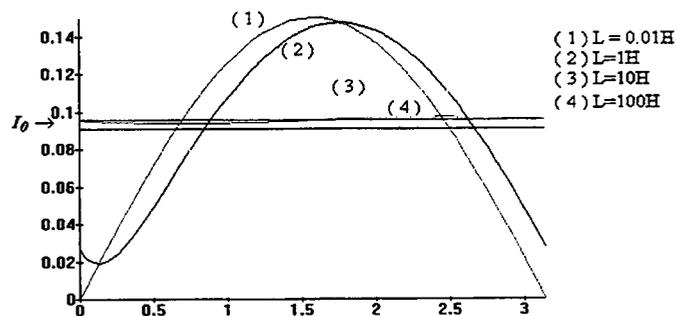


Figura A.1-7. Forma de onda de corrente na carga.

Das figuras A.1-5 e A.1-7, observa-se que a forma de onda de corrente na carga tem uma diminuição da ondulação, ou ultrapassagem, em relação ao seu valor médio, a medida que se aumenta L . Semelhantemente, a medida que se aumenta L , o valor da corrente na carga nos extremos do período (linhas horizontais paralelas ao eixo das abscissas) tendem ao valor médio da corrente na carga (I_o), criando uma corrente mais contínua na carga.

Na figura A.1-6, percebe-se este efeito, pois também aparece uma menor variação da corrente em relação ao valor médio.

Utilizando as fórmulas 2.11 a 2.22 calculou-se as potências e corrente eficaz total na linha, como indicado na tabela A.2:

L	0,01 H	1,0 H	*10,0 H	100,0 H
I_{ef}	0,10606	0,10452	0,095	0,094286
S	22,4996	22,173365	20,1728	20,0011247
P	22,49956	21,9069	18,507	18,24069
Q	0,0	3,1464	2,118	0,225962
$\cos(\phi_1)$	0,9999982	0,989842	0,993514	0,999923
$\cos(\phi)$	0,9999982	0,98798	0,91743	0,91198
R	0,0	3,44091	8,026	8,205011
D	0,0	1,39285	7,7419	8,20189

Tabela A 2- Potências e correntes em função da indutância da carga.

Plotou-se então uma série de curvas em função da indutância L, tal que fossem observados os efeitos das variações das grandezas mostradas na tabela acima.

A figura A.1-8 ilustra a variação do fator de potência da fundamental com a indutância L. Pode-se observar que o fator de potência inicialmente vale 1,0 para L = 0.0 H, reduz-se a 0,977 para L = 3,0H, e tende novamente a 1,0 para valores de L maiores que 3,0H. Este comportamento é explicado com o auxílio da equação analítica que o representa, a qual é dada por

$$\cos \phi_1 = \frac{1,0}{\sqrt{1 + \left(\frac{a1}{b1}\right)^2}}$$

sendo que a1 e b1 dados pelas equações (2.56 e 2.57), os quais são funções de L.

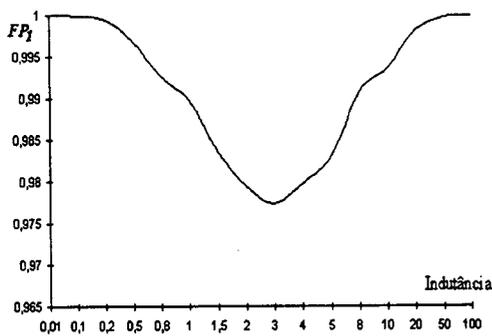


Figura A.1- 8

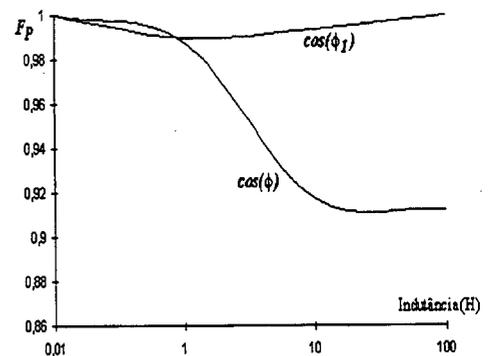


Figura A.1-9

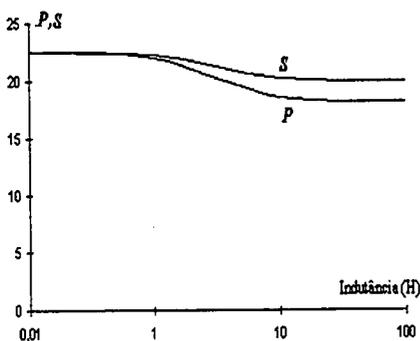


Figura A.1-10

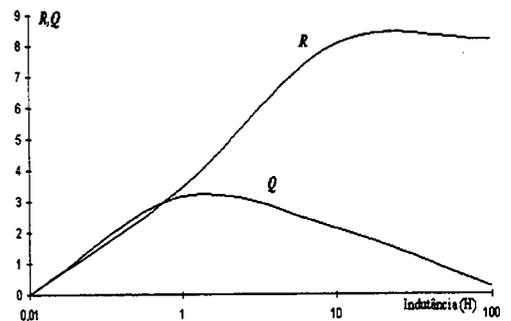


Figura A.1-11

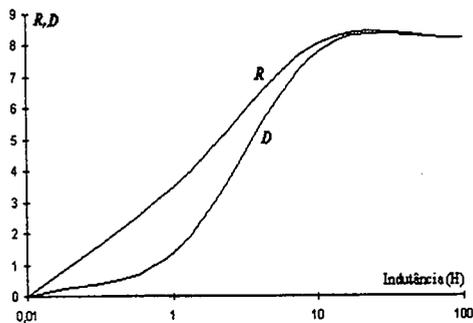


Figura A.1-12

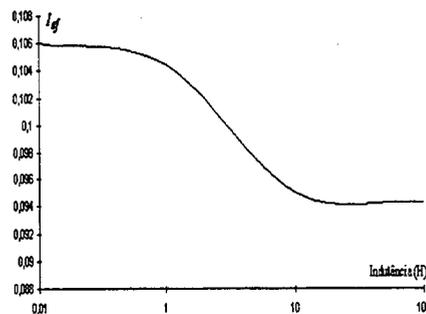


Figura A.1-13

Na figura A.1-9 ilustram-se as variações dos fatores de potência da fundamental $\cos(\phi_1)$ e real $\cos(\phi)$ com a indutância L.

Na figura A.1-10 mostram-se as variações das potências aparente (S) e ativa (P) pela variação de L.

Na figura A.1-11 ilustram-se as variações das potência reativa total (R) e a potência reativa devido a defasagem entre a tensão e corrente (Q) pela variação de L.

Na figura A.1-12 observam-se as variações das potência reativa total (R) e a distorção harmônica (D) por L.

Na figura A.1-13 ilustram-se a variação da corrente eficaz na linha pela variação de L .

A.2.2. Variação de R

Nesta seção, analisam-se as variações de R e L de forma que a constante de tempo permaneça com o mesmo valor do caso base. Assim, chegou-se aos seguintes valores:

$$R=200\Omega \text{ e } L=1 \text{ H}$$

A nova corrente na linha por série de Fourier é dada por

$$I_l(x) = 1,2422.\sin(x - 0.11380078) + 0,38056.\sin(3.x + 0.1748) \\ + 0,2305.\sin(5.x + 0.10533) + 0,1651.\sin(7.x + 0.07512).....$$

Ou seja multiplicou-se apenas a corrente do caso base por 10. Logo as potências envolvidas também serão multiplicadas por 10 .

A.3. Conclusões gerais

1. Quando se aumenta a indutância de alisamento L da carga , consegue-se uma corrente com menos “ripple”, ou seja, quase que contínua. Isto porém, acarreta um aumento das correntes harmônicas na linha, ocasionando uma elevação na potência de distorção, com conseqüente diminuição do fator de potência desta carga.

2. Quando se aumenta a carga, ou seja, quando se diminui R, também se verifica um aumento nas amplitudes harmônicas da corrente na linha.

3. Observando a expressão trigonométrica da corrente fundamental na linha, nota-se que esta está atrasada com relação ao fasor tensão. Daí conclui-se que a carga está absorvendo potência reativa indutiva .

4. A potência ativa na linha tende a potência média na carga para L muito grande.

Apêndice B

Derivadas parciais das equações de balanço de potência e as de balanço de corrente com relação aos módulos das tensões e seus ângulos

Neste apêndice são apresentadas as derivadas parciais das equações de balanço de correntes harmônicas e de potência com relação a cada uma de suas variáveis. De uma forma simplificada o sistema a ser resolvido, indicado pela equação (A.1), apresenta uma matriz Jacobiana que está subdividida em quatro submatrizes de características distintas, isto é

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta I_{re}^H \\ \Delta I_{im}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} JAC^{(1)} & JAC^{(H)} \\ YG^{(H,1)} & YG^{(H,H)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(1)} \\ \Delta V^{(1)} \\ \Delta \theta^{(H)} \\ \Delta V^{(H)} \end{bmatrix} \quad (B-1)$$

B.1. Matriz jacobiana das equações de balanço de potência na frequência fundamental

Esta matriz de dimensão $(NPV + 2NPQT) \times (NPV + 2NPQT)$, contém elementos calculados pelas derivadas parciais das equações de balanço de potência ativas e reativa com respeito aos módulos das tensões e ângulos na frequência fundamental ($h=1$). Ela é particionada em

$$[JAC^{(1)}] = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}$$

Expressando-se as submatrizes desta equação como

$$[H] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad [N] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad [L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}$$

Os elementos das submatrizes são expressos como:

1.1 - Submatriz $[H] \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial \theta}$: derivadas parciais da injeção de potência ativa das barras PQ e PV com relação aos ângulos.

Para $i \neq j$:

$$h_{ij} = V_i \times V_j \times (G_{ij} \times \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \times \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (\text{B-2})$$

Para $i = j$:

$$h_{ii} = -(V_i^2 \times B_{ii} + Q_i^{calc}) \quad (\text{B-3})$$

1.2 - Submatriz $[N] \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial V}$: derivadas parciais das injeções de potência ativa das barras PV e PQ com relação as tensões das barras PQ apenas.

Para $i \neq j$:

$$n_{ij} = V_i \times (G_{ij} \times \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \times \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (\text{B-4})$$

Para $i = j$:

$$h_{ii} = \left(V_i \times G_{ii} + \frac{P_i^{calc}}{V_i} \right) \quad (\text{B-5})$$

1.3 - Submatriz $[M] \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial \theta}$: derivadas parciais das injeções de potência reativa das barras PQ com relação aos ângulos das tensões.

Para $i \neq j$:

$$m_{ij} = -V_i \times V_j \times (G_{ij} \times \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \times \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (\text{B-6})$$

Para $i = j$:

$$m_{ii} = \left(-V_i^2 \times G_{ii} + P_i^{calc} \right) \quad (B-7)$$

1.4 - Submatriz $[L] \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial V}$: derivadas parciais das injeções de potência reativa das barras PQ com relação as tensões das mesmas.

Para $i \neq j$:

$$l_{ij} = V_i \times (G_{ij} \times \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \times \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (B-8)$$

Para $i = j$:

$$l_{ii} = \left(-V_i \times B_{ii} + \frac{Q_i^{calc}}{V_i} \right) \quad (B-9)$$

B.2. Matriz jacobiana das equações de balanço de potência nas frequências harmônicas

Esta matriz, de dimensão $(NPV + 2NPQT) \times (2N)$, contém os elementos calculados pelas derivadas parciais das equações de balanço de potências ativa e reativa com respeito aos módulos das tensões e ângulos nas frequências harmônicas ($h = 3, 5, 7..$) apenas nas barras do tipo NPQNL. Ela é particionada em

$$[JAC^{(H)}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{H_{m \rightarrow n}^{(h)}}{0} & \frac{N_{m \rightarrow n}^{(h)}}{0} \\ \frac{M_{m \rightarrow n}^{(h)}}{0} & \frac{L_{m \rightarrow n}^{(h)}}{0} \end{bmatrix}$$

Explicitamente, as submatrizes que compõem esta matriz são expressas como:

$$[H^{(h)}] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{NPQNL}^{(h)}}{\partial \theta_1^{(h)}} & \dots & \frac{\partial P_{NPQNL}^{(h)}}{\partial \theta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad [N^{(h)}] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{NPQNL}^{(h)}}{\partial V_1^{(h)}} & \dots & \frac{\partial P_{NPQNL}^{(h)}}{\partial V_n^{(h)}} \end{bmatrix}$$

$$[M^{(h)}] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{NPQNL}^{(h)}}{\partial \theta_1^{(h)}} & \dots & \frac{\partial Q_{NPQNL}^{(h)}}{\partial \theta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad [L^{(h)}] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{NPQNL}^{(h)}}{\partial V_1^{(h)}} & \dots & \frac{\partial Q_{NPQNL}^{(h)}}{\partial V_n^{(h)}} \end{bmatrix}$$

onde (h) indica a ordem da harmônica para a qual estão sendo calculadas as derivadas, e NPQNL é o número de barras de cargas não-lineares conectadas ao sistema de energia elétrica. Todos os elementos não nulos dessas matrizes, são calculados da forma convencional para a montagem da matriz Jacobiana na frequência fundamental, equações de (A-2) a (A-9), apenas sendo corrigidos os elementos da matriz de admitâncias na frequência, e incluindo o modelo em frequência das cargas linear e geradores nos respectivos elementos diagonais .

B.3. Matriz Jacobiana das correntes harmônicas das cargas não-lineares com respeito a suas tensões terminais de frequência fundamental

É a matriz das derivadas parciais das expressões da corrente harmônica (h) da corrente na carga não-linear estudada no capítulo 3.4, com respeito a sua tensão terminal na frequência fundamental. Sua dimensão é $2N \times (NPV + 2NPQT)$ e ela é particionada da forma

$$[Y_G^{(H,1)}] = \begin{bmatrix} 0 \\ YG_{Re-nl}^{(H,1)} \\ 0 \\ YG_{IM-nl}^{(H,1)} \end{bmatrix}$$

De forma mais explícita,

$$[Y_G^{(H,1)}] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \dots & 0 \dots & \dots & 0 \\ 0 \dots & ygre_{m-b}^{(n,1)} & \dots & 0 \\ 0 \dots & 0 \dots & ygre_{n-b}^{(n,1)} & \dots \\ 0 \dots & 0 \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \dots & 0 \dots & \dots & 0 \\ 0 \dots & ygre_{m-v}^{(n,1)} & \dots & 0 \\ 0 \dots & 0 \dots & ygre_{n-v}^{(n,1)} & \dots \\ 0 \dots & 0 \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \dots & ygim_{m-b}^{(n,1)} & \dots & 0 \\ 0 \dots & 0 \dots & ygim_{n-b}^{(n,1)} & \dots \\ 0 \dots & 0 \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \dots & ygim_{m-v}^{(n,1)} & \dots & 0 \\ 0 \dots & 0 \dots & ygim_{n-v}^{(n,1)} & \dots \\ 0 \dots & 0 \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$[YG_{Re-nl}^{(H,1)}]$ - é a submatriz das derivadas parciais das partes reais de todas as correntes nas cargas não-lineares [equação (3.59)] com respeito ao módulo e ângulo de suas tensões terminais.

$\frac{\partial gre_i^{(n)}}{\partial v_i^{(1)}}$ - é a derivada parcial da parte real da corrente harmônica (n) da carga (i), com relação ao ângulo da sua tensão na frequência fundamental (m=1), dada por

$$dirb := 4 \frac{\sin(\alpha z) v n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) \left(-\cos(m b) m - m^2 n \omega t \sin(m b) \right)}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) 2n \pi \left(1 + n^2 m^2 \omega t^2 \right)} \quad (B-10)$$

$$ygre_{m \rightarrow b}^{(n,1)} = dirb \quad (B-11)$$

$\frac{\partial gre_i^{(n)}}{\partial v_i^{(1)}}$ - é a derivada parcial da parte real da corrente harmônica (n) da carga (i), com relação ao módulo da sua tensão na frequência fundamental (m=1), dada por

$$dirv := 4 \frac{\sin(\alpha z) n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) \left(-\sin(m b) + m n \omega t \cos(m b) \right)}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) 2n \pi \left(1 + n^2 m^2 \omega t^2 \right)} \quad (B-13)$$

$$ygre_{m \rightarrow v}^{(n,1)} = dirv \quad (B-14)$$

$[YG_{IM-nl}^{(H,1)}]$ - é a submatriz das derivadas parciais das partes imaginárias de todas as correntes nas cargas não-lineares [equação (2.59)] com respeito ao módulo e ângulo de suas tensões terminais.

$\frac{\partial g_{im_i}^{(n)}}{\partial b_i^{(1)}}$ - é a derivada parcial da parte imaginária da corrente harmônica (n) da carga

(i), com relação ao ângulo da sua tensão na frequência fundamental (m=1), dada por:

$$dimb = 4 \frac{\sin(alz) v n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) \left(-\sin(mb) m + m^2 n \omega t \cos(mb) \right)}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) Z n \pi \left(1 + n^2 m^2 \omega t^2 \right)} \quad (B-15)$$

$$y_{gim_{m \rightarrow b}}^{(n,1)} = dimb \quad (B-16)$$

$\frac{\partial g_{im_i}^{(n)}}{\partial v_i^{(1)}}$ - é a derivada parcial da parte imaginária da corrente harmônica (n) da carga

(i), com relação ao módulo da sua tensão na frequência fundamental (m = 1), dada por:

$$dimv = 4 \frac{\sin(alz) n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) \left(\cos(mb) + m n \omega t \sin(mb) \right)}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) Z n \pi \left(1 + n^2 m^2 \omega t^2 \right)} \quad (B-17)$$

$$y_{gim_{m \rightarrow v}}^{(n,1)} = dimv \quad (B-18)$$

onde, v - é o módulo d tensão terminal; b - é ângulo da tensão terminal ; n - é a ordem harmônica; alz - é o ângulo da impedância da carga não-linear (retificador monofásico em ponte alimentando a carga R-L) na frequência n ; Zn - é o módulo da impedância da carga não-linear .

B.4. Matriz Jacobiana das equações de balanço de correntes harmônicas com respeito a suas tensões de frequência harmônica

É a matriz de dimensão $2N \times 2N$, das derivadas parciais das equações de balanço de corrente nas frequências harmônicas (n) com respeito ao módulos das tensões e ângulos de mesma frequência harmônica. Estas matrizes são blocos diagonais da matriz Jacobiana do sistema (A-1). Essas derivadas são divididas em duas partes. Se os elementos diagonais forem os relacionados com as barras de cargas não-lineares, uma é a injeção de corrente e a outra a corrente harmônica que é gerada pela característica não-linear da carga que depende unicamente da tensão terminal. Esta matriz é particionada em

$$[Y_G^{(H,H)}] = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial I_{re}^{(n,n)}}{\partial \theta^{(n)}} \right] & \left[\frac{\partial I_{re}^{(n,n)}}{\partial v^{(n)}} \right] \\ \left[\frac{\partial I_{im}^{(n,n)}}{\partial \theta^{(n)}} \right] & \left[\frac{\partial I_{im}^{(n,n)}}{\partial v^{(n)}} \right] \end{bmatrix}$$

Suas submatrizes são

$$\left[\frac{\partial I_{re}^{(n,n)}}{\partial \theta^{(n)}} \right]$$

- submatriz de ordem $N \times N$, contém elementos obtidos da derivação parcial da parte real das equações de balanço de corrente com relação aos ângulos das tensões de mesma frequência harmônica.

$y_{re}^{\theta}(i, j)$ - os elementos fora da diagonal da submatriz são calculados apenas pela derivação da expressão da injeção de corrente da barra i para a barra j , com respeito ao ângulo da tensão da barra j , pela expressão :

$$diireoj := v_j (-g_{ij} \sin(\alpha_j) - b_{ij} \cos(\alpha_j)) \quad (B-19)$$

$$yg_n^\theta(i, j) = diire\theta_j \quad (B-20)$$

$yg_n^\theta(i, i)$ - os elementos diagonais da submatriz são calculados apenas pela derivação da expressão da injeção de corrente na barra i , com respeito ao ângulo da tensão da própria barra, para as barras de cargas lineares, pela expressão :

$$diireoi := vi (-g_{ii} \sin(o_i) - b_{ii} \cos(o_i)) \quad (B-21)$$

Se o elemento diagonal estiver associado a uma barra de carga não-linear, deve-se somar a expressão (B-21) com a expressão (B-22), para adicionar o efeito da não linearidade da carga.

$$drelb := \frac{v (\cos(b) \sin(alz) - \cos(alz) \sin(b))}{zn} + 4 \frac{\sin(alz) v n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) (-\cos(b) - n \omega t \sin(b))}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) zn \pi (1 + n^2 \omega t^2)} \quad (B-22)$$

$$yg_n^\theta(i, i) = diire\theta_i + (drelb)^* \quad (B-23)$$

$$\left[\frac{\partial I_{re}^{(n,n)}}{\partial v^{(n)}} \right]$$

- esta submatriz de ordem $N \times N$, contém elementos obtidos da derivação parcial da parte real das equações de balanço de corrente com relação aos módulos das tensões de mesma frequência harmônica.

$yg_n^v(i, j)$ - os elementos fora da diagonal da submatriz são calculados apenas pela derivação da expressão da injeção de corrente da barra i para a barra j , com respeito ao módulo da tensão da barra j , pela expressão

$$diirevj := g_{ij} \cos(\alpha_j) - b_{ij} \sin(\alpha_j) \quad (B-24)$$

$$yg_n^v(i, j) = diirev_j \quad (B-25)$$

$yg_n^v(i, i)$ - os elementos diagonais da submatriz são calculados apenas pela derivação da expressão da injeção de corrente na barra i , com respeito ao módulo da tensão da própria barra, para as barras de cargas lineares, pela expressão

$$diirevi := g_{ii} \cos(\alpha_i) - b_{ii} \sin(\alpha_i) \quad (B-26)$$

Se o elemento diagonal estiver associado a uma barra de carga não-linear, deve-se somar a expressão (A-26) com a expressão (A-27), para adicionar o efeito da não linearidade da carga .

$$drelv := \frac{\sin(\alpha z) \sin(b) + \cos(b) \cos(\alpha z)}{zn} + 4 \frac{\sin(\alpha z) n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) (-\sin(b) + n \omega t \cos(b))}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) zn \pi (1 + n^2 \omega t^2)} \quad (B-27)$$

$$yg_n^v(i, i) = diirev_i + (drelv)^* \quad (B-28)$$

$$\left[\frac{\partial I_{im}^{(n,n)}}{\partial \theta^{(n)}} \right]$$

- esta submatriz de ordem $N \times N$, contém elementos obtidos da derivação parcial da parte imaginária das equações de balanço de corrente com relação aos ângulos das tensões de mesma frequência harmônica .

$yg_{im}^{\theta}(i, j)$ - os elementos fora da diagonal da submatriz são calculados apenas pela derivação da parte imaginária da expressão da injeção de corrente da barra i para a barra j com respeito ao ângulo da tensão da barra j , pela expressão

$$diiim\theta_j := v_j (g_{ij} \cos(\theta_j) - b_{ij} \sin(\theta_j)) \quad (B-29)$$

$$yg_{im}^{\theta}(i, j) = diim\theta_j \quad (B-30)$$

$yg_{im}^{\theta}(i, i)$ - os elementos diagonais da submatriz são calculados apenas pela derivação da parte imaginária da expressão da injeção de corrente na barra i , com respeito ao ângulo da tensão da própria barra, para as barras de cargas lineares, pela expressão

$$diiim\theta_i := v_i (g_{ii} \cos(\theta_i) - b_{ii} \sin(\theta_i)) \quad (B-31)$$

Se o elemento diagonal estiver associado a uma barra de carga não-linear, deve-se somar a expressão (B-31) com a expressão (B-32), para adicionar o efeito da não linearidade da carga .

$$dimlb := \frac{v (\sin(alz) \sin(b) + \cos(b) \cos(alz))}{zn} + 4 \frac{\sin(alz) v n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) (-\sin(b) + n \omega t \cos(b))}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) zn \pi (1 + n^2 \omega t^2)} \quad (B-32)$$

$$yg_{im}^{\theta}(i, i) = diim\theta_i + (dimlb)^* \quad (B-33)$$

$$\left[\frac{\partial I_{im}^{(n,n)}}{\partial v^{(n)}} \right]$$

- esta submatriz de ordem $N \times N$, contém elementos obtidos da derivação parcial da parte imaginária das equações de balanço de corrente com relação aos módulos das tensões de mesma frequência harmônica .

$yg_{im}^v(i, j)$ - os elementos fora da diagonal da submatriz são calculados apenas pela derivação da parte imaginária da expressão da injeção de corrente da barra i para a barra j , com respeito ao módulo da tensão da barra j , pela expressão :

$$diiimvj := g_{ij} \sin(\alpha_j) + b_{ij} \cos(\alpha_j) \quad (B-34)$$

$$yg_{im}^v(i, j) = diiimvj \quad (B-35)$$

$yg_{im}^v(i, i)$ - os elementos diagonais da submatriz são calculados apenas pela derivação da parte imaginária da expressão da injeção de corrente na barra i , com respeito ao módulo da tensão da própria barra, para as barras de cargas lineares, pela expressão

$$diiimvi := g_{ii} \sin(\alpha_i) + b_{ii} \cos(\alpha_i) \quad (B-36)$$

Se o elemento diagonal estiver associado a uma barra de carga não-linear deve-se somar a expressão (B-36) com a expressão (B-37) para adicionar o efeito da não linearidade da carga .

$$dimlv := \frac{\cos(\alpha_l) \sin(b) - \cos(b) \sin(\alpha_l)}{zn} + 4 \frac{\sin(\alpha_l) n \omega t \left(1 + e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) (\cos(b) + n \omega t \sin(b))}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{n \omega t}} \right) zn \pi (1 + n^2 \omega t^2)} \quad (B-37)$$

$$yg_{im}^v(i, i) = diiimv_i + (dimlv)^* \quad (B-38)$$

onde, $b = \theta - \epsilon$ é o ângulo da tensão harmônica n ; n - é a frequência harmônica; $m = 1$.

Apêndice C

Serão apresentadas neste apêndice as rotinas que determinam os principais vetores utilizados no método das Somas de Correntes, apresentadas na seção 3.4. O diagrama de um sistema com cinco barras e quatro linhas, mostrado na figura C.1, é utilizado para ilustrar o conteúdo destes vetores.

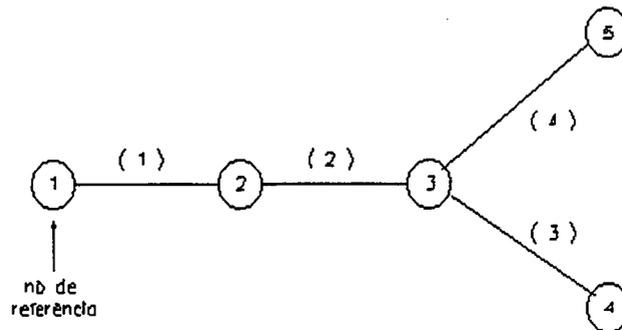


Figura C.1 - Diagrama do sistema exemplo .

C.1. Vetor e Rotina de Adjacências

O vetor de adjacências armazena as barras adjacentes a uma barra em questão. No programa o mesmo foi denotado FORTRAN como ADJ(MM). A rotina que o determina é apresentada a seguir.

```
ROTINA DE ADJACÊNCIAS
MM=0
DO I=1,NBARRA
  FLAG1(I)=MM+1
  M=0
  DO K=1,NLT
    IF((NO(K).EQ.I).OR.(ND(K).EQ.I))THEN
      M=M+1
      MM=MM+1
      NLIAD(MM)=K
      IF(NO(K).EQ.I)THEN
        ADJ(MM)=ND(K)
      ELSE
        ADJ(MM)=NO(K)
      END IF
    END IF
  END DO
  NLIG(I)=M
END DO
END DO
```

Esta rotina também determina os seguintes três vetores: NLIG(I) - é o vetor que contém o número total de barras ligadas a barra I; NDJ(MM) - é o vetor que armazena o número da linha que interliga a barra I com a sua adjacente, tem mesma dimensão de ADJ(MM); FLAG1(I) - é o vetor que aponta para a primeira posição dos vetores ADJ(MM) e NDJ(MM), onde estão armazenados o primeiro elemento adjacente a barra I e o número desta ligação, respectivamente. Com relação ao sistema da figura A3-1, esses vetores são

NB	NLIG	FLAG1	ADJ	NDJ
			1 [2]	1 [1]
			2 [1]	2 [1]
			3 [3]	3 [2]
			4 [2]	4 [2]
			5 [4]	5 [3]
			7 [5]	7 [4]
			8 [3]	8 [3]
1	1	1		
2	2	2		
3	3	4		
4	1	7		
5	1	8		

C.2. Vetor e Rotina de Nível

Vetor que armazena valores inteiros situados entre 1 a N_{máx} (nível máximo encontrado), tem por função indicar a proximidade de uma barra qualquer do sistema com a barra de geração (de referência). A barra de referência recebe o nível um e as demais números maiores do que este. Um ilustração é mostrada na figura C.2 , para o sistema da figura C.1 .

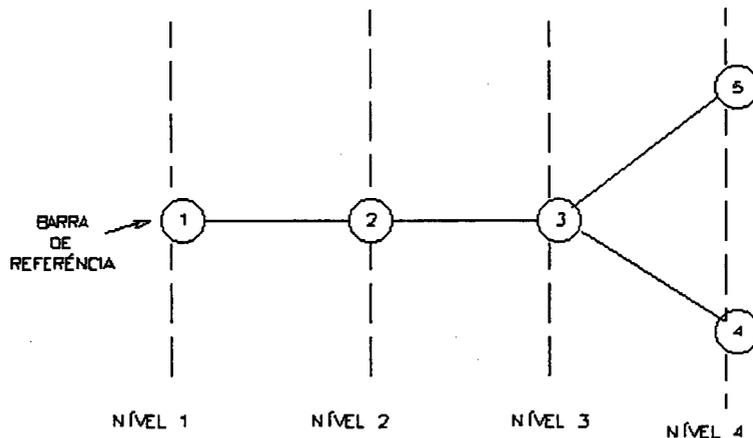


Figura C.2 - Linhas de níveis para o sistema exemplo

Portanto, todas as barras situadas sobre a mesma linha de nível recebem o mesmo número de nível, cujo valor coincide tal linha. O vetor NIVEL(I) foi declarado em FORTRAN, e a rotina que o determina é apresentada a seguir.

```

ROTINA DE NÍVEL
NIMAX=1
NIVEL(1)=1
DO I=2,NBARRA
  NIVEL(I)=0
END DO
DO I=1,NBARRA
  DO K=FLAG1(I),FLAG1(I)+NLIG(I)-1
    VI=ADJ(K)
    IF((VI.NE.1).AND.(NIVEL(VI).EQ.0))THEN
      NIVEL(VI)=NIVEL(I)+1
      IF (NIVEL(VI).GT.NIMAX)THEN
        NIMAX=NIVEL(VI)
      END IF
    END IF
  END DO
END DO

```

Com relação ao sistema da figura A3-1 este vetor é constituído por

NIVEL

1
2
3
4
4

C.3. Vetor e Rotina do BUSUP

O BUSUP é um vetor que informa sobre as barras adjacentes superiores a uma barra em questão. Este vetor foi declarado em FORTRAN como BUSUP(MM), e a rotina que o determina é:

```

ROTINA BUSUP
MM=0
DO I=1,NBARRA
  M=0
  FLAG2(I)=MM+1
  T=NIVEL(I)
  IF((NLIG(I).EQ.1).AND.(I.NE.1))THEN
    MM=MM+1
    M=M+1
    BUSUP(MM)=0
  ELSE
    DO K=FLAG1(I),FLAG1(I)+NLIG(I)-1

```

```

VI=ADJ(K)
W=NIVEL(VI)
NLI=NLIAD(K)
IF(W.GT.T)THEN
MM=MM+1
BUSUP(MM)=VI
NL(MM)=NLI
M=M+1
END IF
END DO
END IF
NBUSUP(I)=M
END DO

```

Nesta rotina são criados mais três vetores, com as seguintes funções: NL(MM) - é o vetor que indica o número da linha que interliga a barra i com a sua Busup; NBUSUP(I) - é o vetor que indica o número de barras adjacentes superiores conectadas a barra I; FLAG2(I) - é o vetor que fornece a primeira posição nos vetores BUSUP(MM) e NL(MM) para a barra I.

As barras que apresentem o valor de NBUSUP(I) =1 com o correspondente BUSUP(MM)= 0 , são barras terminais dos ramos de ligações.

Com relação ao sistema da figura C.1,

NB	NBUSUP	FLAG2	BUSUP	NL
$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{matrix} 1 & \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ 2 & 3 \\ 3 & 4 \\ & 5 \\ 5 & 0 \\ 6 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ 2 & 2 \\ 3 & 3 \\ & 4 \\ 5 & 0 \\ 6 & 0 \end{matrix}$

C.4. Rotina que calcula as correntes acumuladas em cada nó

A rotina em FORTRAN apresentada a seguir, acumula as correntes em cada nó formada pela corrente de carga na própria barra e mais as das suas barras BUSUPS, partindo-se dos nós com níveis mais altos em direção aos mais baixos. Tais valores são armazenados em dois vetores, um para a parte real da corrente IACR(J) e outro para a parte imaginária da corrente IACI(J), levado-se em conta ainda a possibilidade da existência cargas não lineares,

calculadas pelos coeficientes de Fourier para o retificador monofásico apresentado na seção

2.4. O seguinte programa em FORTRAN realiza esta tarefa:

ROTINA QUE CALCULA AS CORRENTES ACUMULADAS EM CADA NÓ

```

C----- CALCULO DAS CORRENTES -----
DO I=1,NBARRA
  IACR(I)=0.0E+00
  IACI(I)=0.0E+00
END DO
DO K=NIMAX,1,-1
  DO J=1,NBARRA
    IF(NIVEL(J).EQ.K)THEN
      DO I=FLAG2(J),FLAG2(J)+NBUSUP(J)-1
        VI=BUSUP(I)
        IF(VI.NE.0)THEN
          IACR(J)=IACR(J)+IACR(VI)
          IACI(J)=IACI(J)+IACI(VI)
        END IF
      END DO
    END DO
    IF (TIP(J).NE.4)THEN
C----- CARGAS LINEARES -----
      IACR(J)=IACR(J)+(PD(J)*DCOS(ANG(J))+QD(J)*DSIN(ANG(J)))
      *(1/V(J))
      IACI(J)=IACI(J)+(PD(J)*DSIN(ANG(J))-QD(J)*DCOS(ANG(J)))
      *(1/V(J))
    ELSE
C----- CARGAS NÃO LINEARES -----
      PI=3.141592654E+00
      WO=2.0*PI*60.0
      arg=0.0
      zlin=0.0
      kcar=0.0
      wt=(WO*LCAR(J))/(RCAR(J))
      zlin=(RCAR(J)**2.0)+((WO*LCAR(J))**2)
      zcar=(dsqrt(zlin))/ZBASE
      arg=(WO*LCAR(J))/(RCAR(J))
      alzcar=Datan(arg)
      kcar=(2.0*(V(J)/zcar)*dsin(alzcar))/(1-dexp(-PI/(wt)))
      AFOR=(V(J)/zcar)*(DSIN(ANG(J))*DCOS(alzcar)-DCOS(ANG(J))*DS
      *IN(alzcar))+(2.0*kcar*wt*(1+dexp(-PI/(wt))))*(dcos(ANG(J))+wt*dsin
      *(ANG(J)))/(PI*(1+(wt)**2))
      BFOR=(V(J)/zcar)*(DCOS(ANG(J))*DCOS(alzcar)+DSIN(ANG(J))*DS
      *IN(alzcar))+(2.0*kcar*wt*(1+dexp(-PI/(wt))))*(wt*dcos(ANG(J))-dsin
      *(ANG(J)))/(PI*(1+(wt)**2))
      IACR(J)=IACR(J)+BFOR
      IACI(J)=IACI(J)+AFOR
    END IF
  END IF
END DO
END DO

```

C.5. Rotina das correções das tensões

Utilizando as quedas de tensões nas linhas, devido a circulação de correntes da geração em direção as cargas existentes nos sistemas radiais, são corrigidas as tensões pela utilização das fórmulas (3.63) e (3.64) encontradas na seção 3.4. As correções partem das barras adjacentes a barra de referência até as barras de nível mais alto (NIMAX). A rotina que efetua estas correções é apresentada.

```

ROTINA DAS CORREÇÕES DAS TENSÕES
DO K=1,NIMAX
DO J=1,NBARRA
IF(NIVEL(J).EQ.K)THEN
DO I=FLAG2(J),FLAG2(J)+NBUSUP(J)-1
N=NL(I)
VI=BUSUP(I)
IF(VI.NE.0)THEN
VRE(VI)=V(J)*DCOS(ANG(J))-(R(N)*IACR(VI)-X(N)*IACI(VI))
VIM(VI)=V(J)*DSIN(ANG(J))-(R(N)*IACI(VI)+X(N)*IACR(VI))
VAUX(VI)=V(VI)
V(VI)=DSQRT(VRE(VI)**2+VIM(VI)**2)
ANGAX(VI)=ANG(VI)
ANG(VI)=DATAN2(VIM(VI),VRE(VI))
END IF
END DO
END IF
END DO
END DO

```

Apêndice D

Este apêndice apresenta o formato em FORTRAN dos dados necessários para a execução dos programas, apresentados nesta dissertação (HARMO, FLHAR4 e FHIC). Estes dados estão divididos entre dados de barra e dados de linha, os quais devem ser escritos segundo:

D.1 - TÍTULO DO CASO ESTUDADO - (1- 22): o título do caso estudado deve apresentar no máximo 22 caracteres, nas colunas (1-22). Seu formato é A12.

D.2 - DADOS DE LINHA - (1-3): nas colunas (1-3) escreve-se o número de identificação de campo de dados de linha (nº 1), com o formato I3.

D.2.1 - Nó origem e nó destino - (1-3) e (5-7): as colunas de (1-3) e (4-5) correspondem aos números das barras ligadas pela linha em questão, no formato I3 , 1X , I3)

D.2-2 - Resistência D.C. - (9-13): nas colunas (9-13) escreve-se o valor da resistência D.C. da linha de transmissão em (*ohm / Km*) a 25°C, no formato D5.3.

D.2-3 - Raio médio geométrico - (15-22): nas colunas (15-22) escreve-se o valor do raio médio geométrico do condutor da linha em metros (m), no formato E8.4.

D.2-4 - Espaçamento entre condutores - (24-28): nas colunas (24-8) escreve-se o espaçamento entre os três condutores do sistema trifásico em metro (m), no formato D5.3.

D.2-5 - Valor do tap - (30-34): nas colunas (30-34) escreve-se o valor da relação de transformação para as linhas que apresentam transformadores, a qual deve estar situada no intervalo ($0.905 < \text{tap} < 1.050$), no formato D5.3.

D.2-6 - Impedância base do sistema (36-40): nas colunas (36-40) é colocado o valor da impedância base a 60Hz (em ohm) para o sistema, no formato D5.3.

D.2-7 - Comprimento da linha - (42-46): nas colunas (42-46) escreve-se o valor do comprimento do trecho da linha em questão em (km), no formato D5.3.

D.3 - DADOS DE BARRA - (1-3): nas colunas (1-3) escreve-se o número de identificação de campo de dados de Barra (nº 2), com o seguinte formato: I3.

D.3.1- Numero da Barra (1-3): nas colunas (1-3) é colocado o número da barra, com o formato I3.

D.3.2 - Tipo da barra (5): na coluna (5) é colocado o número que indica o tipo de barra. São utilizados os números: 1 para a barra de folga, 2 para as barras do tipo PV, 3 para barras do tipo PQ e 4 para as barras do tipo PQNL. O formato é I1.

D.3.3 - Módulo da tensão (7-12): nas colunas (7-12) é escrito o valor do módulo da tensão de barra na frequência fundamental em p.u., com o formato D6.4.

D.3.4 - Ângulo da tensão (14-18): nas colunas (14 -18) é escrito o valor em radianos do ângulo da tensão de barra na frequência fundamental, com o formato D5.3.

D.3.4 - Potências geradas (20-24) e (26-30): nas colunas (20-24) e (26-30) são colocados os valores respectivamente da potência ativa gerada e da potência reativa gerada ambas em p.u., no formato D5.3 , 1X , D5.3.

D.3.5 - Potências demandadas (32-37) e (39-44): nas colunas (32-37) e (39-44) são escritos os valores das potências ativas e reativas, devido a defasagem entre a tensão e corrente de mesma frequência, em p.u., no formato D6.4 , 1X , D6.4.

D.3.6- Indutância subtransitória do gerador (46-53): nas colunas (46-53) escreve-se o valor em henry da indutância subtransitória média (quadratura e eixo direto) para as máquinas síncronas, no formato E8.5.

D.3.6 - Resistência da carga não-linear (55-60): nas colunas (55-60) escreve-se o valor da resistência da carga não linear estudada na seção 2.4 em ohm, no formato D6.4.

D.3.6 - Indutância da carga não-linear (62-68): nas colunas (62-68) escreve-se o valor da indutância da carga não-linear em henry , no formato E7.5.

Abaixo é apresentado o arquivo SIST.DAD utilizado no exemplo 1 da seção IV.1.

SISTEMA COM 2 BARRAS

```
1
1 2 2.175 1.696E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
999
2
1 1 1.0450 0.000 0.000 0.000 0.0000 0.0000 1.00E-06 0.0000 0.0E+00
2 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.1771 0.0183 0.00E+00 2.0000 1.0E-02
999
```

O arquivo SIST1.DAD utilizado na simulação apresentada em IV.2 é:

SISTEMA COM 4 BARRAS

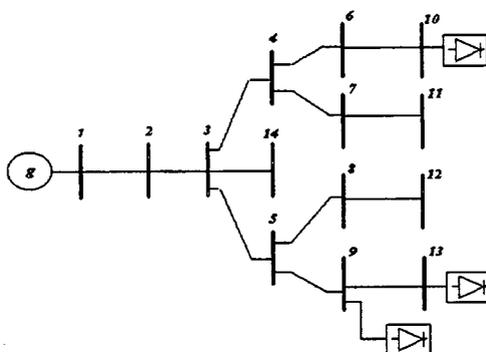
```
1
1 2 0.677 2.270E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
2 3 2.175 1.696E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
2 4 2.175 1.696E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
999
2
1 1 1.0500 0.000 0.000 0.000 0.0000 0.0000 1.00E-06 0.0000 0.0E+00
2 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0000 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
3 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.1000 0.0190 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
4 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.1703 0.0167 0.00E+00 2.0000 1.0E-02
999
```

As linhas contidas neste arquivo apresentam condutores diferentes. Assim os seguintes trechos utilizam os condutores: 1-2 - Cabo 3 AWG (cobre); - 2-3 e 2-4 - Cabos 6 AWG, ROSE (alumínio).

Apêndice E

Neste apêndice são apresentadas as entradas de dados para os sistemas de 14, 22 e 34 barras, no formato apresentado no apêndice D, para simulação com os programas desenvolvidos neste trabalho.

E.1. SISTEMA COM 14 BARRAS USADO NO FLUXO HARMÔNICO



Dados de linha

NO	NI	Rdc	raio(m)	D(m)	tap	Zbase	L(Km)
1	2	0.145	5.790E-3	1.000	0.000	0.484	0.100
2	3	0.145	5.790E-3	1.000	0.000	0.484	0.100
3	4	0.145	5.790E-3	1.000	0.000	0.484	0.100
3	5	0.145	5.790E-3	1.000	0.000	0.484	0.100
3	14	0.344	3.392E-3	1.000	0.000	0.484	0.100
4	6	0.677	2.227E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
4	7	0.677	2.227E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
5	8	0.677	2.227E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
5	9	0.677	2.227E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
6	10	0.677	2.226E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
7	11	0.677	2.226E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
8	12	0.677	2.226E-3	1.000	0.000	0.484	0.050
9	13	0.677	2.226E-3	1.000	0.000	0.484	0.050

Dados de barra

NB	TIPO	V(pu)	angulo	PG	QG	PD	QD	X'd	Rc	Lc
1	1	1.0550	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	1.00E-06	0.0000	0.0E+00
2	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0300	0.0010	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
3	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0400	0.0000	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
4	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0200	0.0000	0.00E+0	0.0000	0.0E+00

5	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0200	0.0000	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
6	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0500	0.0080	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
7	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0100	0.0020	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
8	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0100	0.0000	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
9	4	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0108	0.0010	0.00E+0	8.0000	1.0E+00
10	4	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0171	0.0183	0.00E+0	4.0000	1.0E+00
11	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0180	0.0084	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
12	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0171	0.0013	0.00E+0	0.0000	0.0E+00
13	4	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0171	0.0083	0.00E+0	4.0000	1.0E+00
14	3	1.0000	0.000	0.000	0.000	0.0210	0.0080	0.00E+0	0.0000	0.0E+00

Dados de barras

- NB- TIP -- Vef-- --Ief-- --P-- --Q-- --S(VA)-- FP

1	1	1.0550	.4866	.4987	.0731	.5133	.9716
2	3	1.0351	.0290	.0300	.0010	.0301	.9983
3	3	1.0186	.0395	.0400	.0000	.0402	.9950
4	3	1.0115	.0199	.0200	.0000	.0201	.9928
5	3	1.0138	.0199	.0200	.0000	.0202	.9913
6	3	1.0006	.0510	.0500	.0080	.0510	.9807
7	3	1.0089	.0102	.0100	.0020	.0103	.9755
8	3	1.0116	.0100	.0100	.0000	.0101	.9913
9	4	1.0040	.0528	.0483	.0016	.0530	.9121
10	4	.9942	.1046	.0949	.0034	.1040	.9121
11	3	1.0071	.0198	.0180	.0084	.0199	.9024
12	3	1.0102	.0171	.0171	.0013	.0173	.9893
13	4	.9976	.1048	.0953	.0039	.1045	.9118
14	3	1.0163	.0222	.0210	.0080	.0225	.9316

TAXAS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

-- NB----THDV(%)---TDHI(%)--

1	0.033	19.247
2	3.488	3.407
3	7.085	7.085
4	8.492	8.492
5	9.383	9.382
6	9.471	6.972
7	8.481	5.644
8	9.365	9.365
9	10.935	40.340
10	10.522	40.520
11	8.478	3.616
12	9.347	8.361
13	11.991	40.322
14	7.067	3.400

FUNDAMENTAL

--MODULO--ANGULO

1.0550	.0000
1.0344	-1.9750
1.0161	-3.8962
1.0079	-4.7405
1.0093	-4.7628
.9962	-5.1004
1.0053	-4.7707
1.0072	-4.8298
.9980	-5.1532
.9887	-5.3647
1.0035	-4.7826
1.0058	-4.8701
.9905	-5.4175
1.0138	-3.9649

TENSOES HARMONICAS

TOLERANCIA 9.99999974752427E-007
NºBARRA --MODULO-- --FASE(GRAUS)--

----HARMONICA DE ORDEM--- 3.000000

1 .0001697 -120.535

2 .0178294 -128.555

3 .0355179 -128.403

4 .0423862 -128.436

5 .0464995 -127.815

6 .0469025 -130.191

7 .0422481 -128.492

8 .0463824 -128.012

9 .0536800 -129.969

10 .0517360 -131.393

11 .0421621 -128.508

12 .0463008 -128.128

13 .0584692 -131.159

14 .0353798 -128.508

----HARMONICA DE ORDEM--- 5.000000

1 .0001595 -139.068

2 .0166569 -144.207

3 .0331979 -143.918

4 .0394984 -143.773

5 .0436235 -143.188

6 .0435351 -144.551

7 .0393506 -143.831

8 .0434818 -143.499

9 .0502071 -144.031

10 .0479443 -144.892

11 .0392666 -143.843

12 .0433741 -143.677

13 .0545822 -144.559

14 .0330431 -144.003

----HARMONICA DE ORDEM--- 7.0

1 .0001490 -156.390

2 .0155395 -160.353

3 .0309999 -159.947

4 .0368168 -159.552

5 .0408336 -159.145

6 .0405304 -159.774

7 .0366679 -159.605

8 .0406644 -159.552

9 .0470050 -159.304

10 .0446668 -159.649

11 .0365883 -159.614

12 .0405276 -159.774

13 .0511143 -159.499

14 .0308445 -160.015

----HARMONICA DE ORDEM--- 9.000000

1 .0001614 -170.722

2 .0168151 -174.060

3 .0335778 -173.546

4 .0398084 -172.959

5 .0443287 -172.618

6 .0437849 -172.804

7 .0396393 -173.006

8 .0441038 -173.105

9 .0510852 -172.296

10 .0482818 -172.386

11 .0395523 -173.013	6 .0353089 170.536
12 .0439148 -173.353	7 .0319358 169.974
13 .0556247 -172.257	8 .0354334 169.434
14 .0334046 -173.600	9 .0410852 170.628
----HARMONICA DE ORDEM--- 11	10 .0389923 171.217
1 .0001297 171.426	11 .0318654 169.969
2 .0135102 168.478	12 .0352509 169.172
3 .0270155 169.079	13 .0447404 170.793
4 .0320755 170.015	14 .0268742 169.035
5 .0356454 169.987	PERDAS ATIVAS 2.414578207106662E-002

Dados de entrada para método de Newton convencional.

SISTEMA 14 BARRAS TESTE

```

1
1 2 0.033 0.080 0.000 0.000
2 3 0.033 0.080 0.000 0.000
3 4 0.033 0.080 0.000 0.000
3 5 0.080 0.080 0.000 0.000
3 14 0.078 0.088 0.000 0.000
4 6 0.077 0.047 0.000 0.000
4 7 0.077 0.047 0.000 0.000
5 8 0.077 0.047 0.000 0.000
5 9 0.077 0.047 0.000 0.000
6 10 0.077 0.047 0.000 0.000
7 11 0.077 0.047 0.000 0.000
8 12 0.077 0.047 0.000 0.000
9 13 0.077 0.047 0.000 0.000
999
2
1 1 1.055 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
2 3 1.035 0.000 0.000 0.000 0.030 0.001
3 3 1.018 0.000 0.000 0.000 0.040 0.000
4 3 1.012 0.000 0.000 0.000 0.020 0.000
5 3 1.014 0.000 0.000 0.000 0.020 0.000
6 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.050 0.008
7 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.010 0.002
8 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.010 0.000
9 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.048 0.002
10 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.095 0.003
11 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.018 0.008
12 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.017 0.001
13 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.095 0.004
14 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.021 0.008
999
NTI= 2TOLER.= 9.999999747378752E-005

```

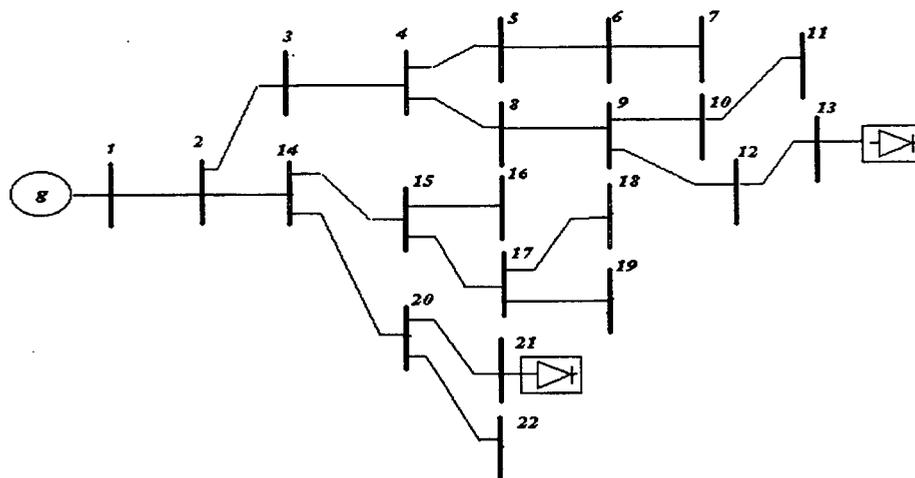
```

*****
NB TIP V(pu)  ÂNGULO P(puW) Q(puVar) S(puVA)  FP
*****
1 1  1.0550  .0000  .4973 .0803  .5037  .9872
2 3  1.0340 -1.9508 .0300 .0010  .0300  .9995
3 3  1.0151 -3.8488 .0400 .0001  .0400  1.000
4 3  1.0068 -4.6838 .0200 .0000  .0200  1.000
5 3  .9989  -4.6802 .0200 .0000  .0200  1.0000
6 3  .9950  -5.0251 .0500 .0080  .0506  .9875
7 3  1.0042 -4.7147 .0100 .0020  .0102  .9806
8 3  .9968  -4.7488 .0100 .0000  .0100  1.0000
9 3  .9874  -5.0437 .0480 .0020  .0480  .9991
10 3 .9874 -5.2720 .0950 .0030  .0950  .9995
11 3 1.0024 -4.7278 .0180 .0080  .0197  .9138
12 3 .9954 -4.7905 .0170 .0010  .0170  .9983
13 3 .9797 -5.2898 .0950 .0040  .0951  .9991
14 3 1.0128 -3.9170 .0210 .0080  .0225  .9346

```

PERDAS 2.334309754377863E-002

E.2. SISTEMA COM 22 BARRAS USADO NO FLUXO HARMÔNICO



SISTEMA COM 22 BARRAS

Dados de Linha

```

1
1 2 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
2 3 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
2 14 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
3 4 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
4 5 0.344 3.392E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
4 8 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
5 6 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
6 7 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
8 9 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050

```

9 10 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 9 12 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 10 11 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 12 13 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 14 15 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 14 20 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 15 16 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 15 17 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 17 18 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 17 19 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 20 21 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
 20 22 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050

999

Dados de Barra

2

1 1 1.0550 0.000 0.000 0.000 0.0000 0.0000 1.00E-06 0.0000 0.0E+00
 2 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0300 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 3 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0400 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 4 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0200 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 5 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0200 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 6 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0500 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 7 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0100 0.0020 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 8 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0100 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 9 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0108 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 10 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0183 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 11 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0180 0.0084 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 12 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0013 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 13 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 2.0000 1.0E+01
 14 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0210 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 15 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0108 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 16 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0183 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 17 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0180 0.0084 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 18 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0013 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 19 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 20 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0210 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
 21 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 3.0000 1.0E+01
 22 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0210 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00

999

NUMERO DE ITERAÇÕES PARA CALCULAR AS HARMONICAS = 58
 TOLERANCIA 9.999999974752427E-007

Dados de barras

- NB-	TIP	-- Vef--	--Ief--	--P--	--Q--	--D--	--S(VA)--	FP
1	1	1.0550	.7181	.7265	.1847	.1098	.7576	.9589
2	3	1.0201	.0295	.0300	.0010	.0016	.0301	.9980
3	3	1.0029	.0400	.0400	.0000	.0035	.0401	.9963
4	3	.9884	.0204	.0200	.0000	.0024	.0201	.9927
5	3	.9809	.0205	.0200	.0000	.0024	.0201	.9929
6	3	.9756	.0522	.0500	.0080	.0053	.0509	.9820
7	3	.9747	.0105	.0100	.0020	.0010	.0103	.9755
8	3	.9684	.0104	.0100	.0000	.0015	.0101	.9894
9	3	.9496	.0116	.0108	.0010	.0018	.0110	.9829
10	3	.9453	.0267	.0171	.0183	.0032	.0252	.6773

11	3	.9434	.0212	.0180	.0084	.0026	.0200	.8982
12	3	.9365	.0186	.0171	.0013	.0033	.0175	.9794
13	4	.9253	.1916	.1612	.0089	.0731	.1773	.9096
14	3	1.0066	.0224	.0210	.0080	.0014	.0225	.9327
15	3	.9986	.0109	.0108	.0010	.0008	.0109	.9930
16	3	.9964	.0252	.0171	.0183	.0015	.0251	.6816
17	3	.9937	.0200	.0180	.0084	.0012	.0199	.9045
18	3	.9923	.0173	.0171	.0013	.0013	.0172	.9943
19	3	.9920	.0192	.0171	.0083	.0012	.0190	.8980
20	3	1.0037	.0224	.0210	.0080	.0017	.0225	.9320
21	4	.9947	.1401	.1272	.0036	.0568	.1394	.9127
22	3	1.0017	.0225	.0210	.0080	.0017	.0225	.9320

TAXAS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

-- NB----THDV(%)----TDHI(%)--

1	.035	14.642
2	3.796	3.716
3	6.122	6.121
4	8.587	8.586
5	8.471	8.471
6	8.419	6.357
7	8.411	5.744
8	10.353	10.353
9	12.207	10.589
10	12.209	3.471
11	12.204	5.334
12	14.152	12.739
13	16.191	37.849
14	5.596	2.778
15	5.579	4.853
16	5.581	1.618
17	5.565	2.486
18	5.555	5.022
19	5.563	2.425
20	6.590	3.271
21	7.969	40.950
22	6.585	3.264

FUNDAMENTAL

MODULO---ANGULO--

1.0550	.0000
1.0194	-2.7820
1.0010	-4.4619
.9847	-6.0142
.9774	-6.3903
.9721	-6.5160
.9712	-6.5356
.9632	-6.5595
.9426	-7.0991
.9384	-7.0743
.9365	-7.0881
.9272	-7.6562
.9134	-8.1828
1.0050	-3.8956
.9971	-3.9495
.9949	-3.9153
.9921	-4.0132
.9908	-4.0548
.9904	-4.0235
1.0015	-4.2724
.9915	-4.6252
.9995	-4.2944

TENSOES HARMONICAS

TOLERANCIA 9.999999974752427E-007

NºB --MODULO -FASE(GRAUS)--

----HARMONICA DE ORDEM---- 3.000000

1	.0001978	-126.946
2	.0207839	-134.967
3	.0324781	-138.755
4	.0442749	-140.128
5	.0437249	-141.133
6	.0433918	-141.462
7	.0433346	-141.507
8	.0520326	-143.113
9	.0599349	-145.240
10	.0596779	-145.235
11	.0595387	-145.252
12	.0682348	-146.797
13	.0767119	-147.890
14	.0298670	-130.628
15	.0296058	-130.823
16	.0295536	-130.804
17	.0294322	-130.970
18	.0293785	-131.089
19	.0293741	-130.983
20	.0346569	-129.046
21	.0412348	-130.636
22	.0345699	-129.080

----HARMONICA DE ORDEM---- 5.000000

1	.0001775	-147.874
2	.0185381	-153.012
3	.0290466	-159.403

4	.0397446	-161.708
5	.0390006	-163.066
6	.0385900	-163.466
7	.0385230	-163.518
8	.0466468	-163.593
9	.0536226	-164.863
10	.0533899	-164.861
11	.0532589	-164.874
12	.0609509	-165.731
13	.0684666	-166.225
14	.0268406	-145.680
15	.0265707	-145.972
16	.0265258	-145.959
17	.0263912	-146.176
18	.0263241	-146.361
19	.0263370	-146.185
20	.0313405	-143.192
21	.0373122	-142.893
22	.0312542	-143.219

----HARMONICA DE ORDEM---- 7.000000

1	.0001576	-166.915
2	.0164314	-170.878
3	.0258699	-179.905
4	.0356085	176.879
5	.0347663	175.324
6	.0343204	174.925
7	.0342507	174.877
8	.0419188	175.375
9	.0482828	174.445

10	.0480719	174.445
11	.0479516	174.435
12	.0549885	173.860
13	.0619144	173.638
14	.0240508	-160.586
15	.0237728	-160.939
16	.0237332	-160.929
17	.0235889	-161.181
18	.0235072	-161.410
19	.0235399	-161.188
20	.0283018	-157.266
21	.0338888	-155.803
22	.0282205	-157.288

----HARMONICA DE ORDEM---- 9.000000

1	.0001630	173.207
2	.0169858	169.869
3	.0277297	158.116
4	.0389676	154.202
5	.0379149	152.510
6	.0373692	152.142
7	.0372868	152.099
8	.0462776	152.902
9	.0536408	152.185
10	.0534070	152.186
11	.0532729	152.178
12	.0614124	151.778
13	.0694956	151.724
14	.0244962	-176.048
15	.0241767	-176.433

16	.0241365	-176.425
17	.0239663	-176.697
18	.0238604	-176.952
19	.0239161	-176.702
20	.0288993	-171.592
21	.0347307	-168.891
22	.0288150	-171.609

----HARMONICA de ORDEM---- 11.00

1	.0001225	158.927
2	.0127647	155.979
3	.0204467	141.315
4	.0286919	136.294
5	.0278517	134.475
6	.0274216	134.143
7	.0273579	134.105
8	.0340935	134.962
9	.0395346	134.273
10	.0393617	134.274
11	.0392623	134.268
12	.0452979	133.888
13	.0513374	133.869
14	.0192945	172.404
15	.0190172	172.002
16	.0189857	172.008
17	.0188348	171.723
18	.0187349	171.450
19	.0187953	171.719
20	.0231681	177.224
21	.0282297	-179.762

 22 .0231001 177.209

Dados para o sistema de 22 barras para simulação via Newton-Raphson convencional

SISTEMA 22 BARRAS TESTE
 DADOS DE LINHA

1
 1 2 0.033 0.080 0.000 0.000
 2 3 0.033 0.080 0.000 0.000
 2 14 0.033 0.080 0.000 0.000
 3 4 0.033 0.080 0.000 0.000
 4 5 0.078 0.088 0.000 0.000
 4 8 0.077 0.047 0.000 0.000
 5 6 0.077 0.047 0.000 0.000
 6 7 0.077 0.047 0.000 0.000
 8 9 0.077 0.047 0.000 0.000
 9 10 0.077 0.047 0.000 0.000
 9 12 0.077 0.047 0.000 0.000
 10 11 0.077 0.047 0.000 0.000
 12 13 0.077 0.047 0.000 0.000
 14 15 0.077 0.047 0.000 0.000
 14 20 0.017 0.040 0.000 0.000
 15 16 0.077 0.047 0.000 0.000
 15 17 0.077 0.047 0.000 0.000
 17 18 0.077 0.047 0.000 0.000
 17 19 0.077 0.047 0.000 0.000
 20 21 0.077 0.047 0.000 0.000
 20 22 0.077 0.047 0.000 0.000

999

DADOS DE BARRA

2
 1 1 1.055 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 2 3 1.035 0.000 0.000 0.000 0.030 0.001
 3 3 1.018 0.000 0.000 0.000 0.040 0.000
 4 3 1.012 0.000 0.000 0.000 0.020 0.000
 5 3 1.014 0.000 0.000 0.000 0.020 0.000
 6 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.050 0.008
 7 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.010 0.002
 8 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.010 0.000
 9 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.011 0.001
 10 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.017 0.018
 11 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.018 0.008
 12 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.017 0.001
 13 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.161 0.009
 14 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.021 0.008
 15 3 1.055 0.000 0.000 0.000 0.011 0.001
 16 3 1.035 0.000 0.000 0.000 0.017 0.018
 17 3 1.018 0.000 0.000 0.000 0.018 0.008
 18 3 1.012 0.000 0.000 0.000 0.017 0.001
 19 3 1.014 0.000 0.000 0.000 0.017 0.008
 20 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.021 0.008
 21 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.127 0.004
 22 3 1.000 0.000 0.000 0.000 0.021 0.008

NTI= 3TOLER.= 9.999999747378752E-005

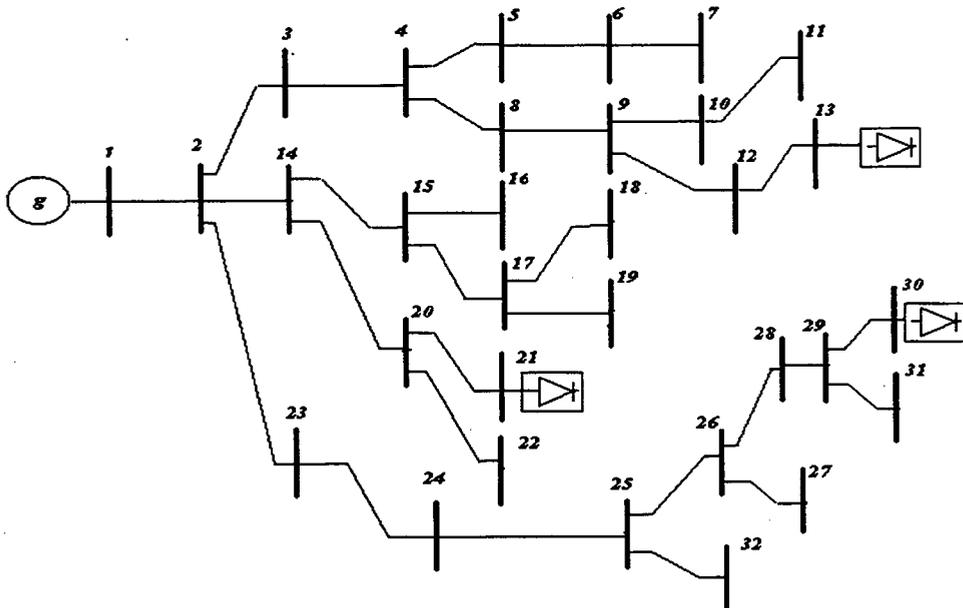
```

*****
NB TIP V(pu)  ÂNGULO P(puW) Q(puVar) S(puVA)  FP
*****
1 1 1.055 .0000 .7217 .194 .7474 .965
2 3 1.018 -2.7368 .0300 .0010 .0300 .9994
3 3 1.000 -4.3866 .0400 .0000 .0400 1.000
4 3 .9832 -5.9096 .0200 .0000 .0200 1.000
5 3 .9759 -6.2841 .0200 .0000 .0200 1.000
6 3 .9706 -6.4081 .0500 .0080 .0506 .9874
7 3 .9697 -6.4274 .0100 .0020 .0102 .9806
8 3 .9615 -6.4035 .0100 .0000 .0100 1.000
9 3 .9407 -6.8899 .0110 .0010 .0110 .9959
10 3 .9365 -6.8667 .0170 .0180 .0248 .6866
11 3 .9346 -6.8817 .0180 .0080 .0197 .9138
12 3 .9250 -7.3901 .0170 .0010 .0170 .9983
13 3 .9109 -7.8575 .1610 .0090 .1613 .9984
14 3 1.004 -3.8355 .0210 .0080 .0225 .9345
15 3 .9965 -3.8921 .0110 .0010 .0110 .9959
16 3 .9943 -3.8582 .0170 .0180 .0248 .6866
17 3 .9916 -3.9579 .0180 .0080 .0197 .9138
18 3 .9903 -4.0000 .0170 .0010 .0170 .9983
19 3 .9899 -3.9686 .0170 .0080 .0188 .9048
20 3 1.000 -4.2037 .0210 .0080 .0225 .9345
21 3 .9906 -4.5310 .1270 .0040 .1271 .9995
22 3 .9987 -4.2250 .0210 .0080 .0225 .9345

```

PERDAS 4.772611721751738E-002

E.3. Sistema com 32barras para simulação harmônica



SISTEMA COM 32 BARRAS

DADOS DE LINHA

1

1 2 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
2 3 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
2 14 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
2 23 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
3 4 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
4 5 0.344 3.392E-3 1.000 0.000 0.484 0.100
4 8 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
5 6 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
6 7 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
8 9 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
9 10 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
9 12 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
10 11 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
12 13 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
14 15 0.677 2.227E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
14 20 0.145 5.790E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
15 16 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
15 17 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
17 18 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
17 19 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
20 21 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
20 22 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
23 24 0.344 3.392E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
24 25 0.344 3.392E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
25 26 0.344 3.392E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
25 32 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
26 27 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
26 28 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
28 29 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
29 30 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050
29 31 0.677 2.226E-3 1.000 0.000 0.484 0.050

999

DADOS DE BARRA

2

1 1 1.0550 0.000 0.000 0.000 0.0000 0.0000 1.00E-06 0.0000 0.0E+00
2 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0100 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
3 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0100 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
4 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0200 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
5 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0200 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
6 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0500 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
7 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0200 0.0020 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
8 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0200 0.0000 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
9 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0208 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
10 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0271 0.0183 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
11 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0280 0.0084 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
12 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0013 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
13 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 9.0000 1.0E+02
14 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0110 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
15 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0208 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
16 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0271 0.0183 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
17 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0280 0.0084 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
18 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0013 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
19 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0371 0.0083 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
20 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0210 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
21 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 8.0000 1.0E+02

```

22 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0210 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
23 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0013 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
24 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
25 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0110 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
26 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0108 0.0010 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
27 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0183 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
28 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0180 0.0084 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
29 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0013 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
30 4 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 9.0000 1.0E+02
31 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0110 0.0080 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
32 3 1.0000 0.000 0.000 0.000 0.0171 0.0083 0.00E+00 0.0000 0.0E+00
999

```

NUMERO DE ITERAÇÕES PARA CALCULAR AS HARMONICAS = 6
TOLERANCIA 9.99999974752427E-007

Dados de barras

-NB-	TIP	--Vef--	--Ief--	--P--	--Q--	--D--	--S(VA)--	FP
1	1	1.0550	.7276	.7291	.2347	.0512	.7677	.9498
2	3	1.0156	.0099	.0100	.0010	.0002	.0101	.9948
3	3	1.0023	.0100	.0100	.0000	.0003	.0100	.9994
4	3	.9899	.0202	.0200	.0000	.0009	.0200	.9991
5	3	.9817	.0204	.0200	.0000	.0008	.0200	.9991
6	3	.9757	.0519	.0500	.0080	.0019	.0507	.9868
7	3	.9740	.0207	.0200	.0020	.0008	.0201	.9943
8	3	.9763	.0205	.0200	.0000	.0010	.0200	.9988
9	3	.9643	.0216	.0208	.0010	.0011	.0209	.9974
10	3	.9585	.0341	.0271	.0183	.0014	.0327	.8280
11	3	.9559	.0306	.0280	.0084	.0013	.0293	.9569
12	3	.9598	.0179	.0171	.0013	.0010	.0172	.9954
13	4	.9568	.0453	.0396	.0007	.0175	.0433	.9142
14	3	1.0028	.0136	.0110	.0080	.0004	.0136	.8085
15	3	.9909	.0210	.0208	.0010	.0007	.0208	.9982
16	3	.9879	.0331	.0271	.0183	.0009	.0327	.8284
17	3	.9835	.0297	.0280	.0084	.0009	.0292	.9574
18	3	.9821	.0175	.0171	.0013	.0006	.0172	.9965
19	3	.9802	.0388	.0371	.0083	.0012	.0380	.9754
20	3	1.0008	.0225	.0210	.0080	.0008	.0225	.9340
21	4	.9972	.0532	.0485	.0007	.0214	.0530	.9148
22	3	.9988	.0225	.0210	.0080	.0008	.0225	.9340
23	3	1.0100	.0170	.0171	.0013	.0005	.0172	.9967
24	3	1.0009	.0190	.0171	.0083	.0005	.0190	.8993
25	3	.9928	.0137	.0110	.0080	.0004	.0136	.8083
26	3	.9867	.0110	.0108	.0010	.0005	.0109	.9948
27	3	.9844	.0255	.0171	.0183	.0009	.0251	.6823
28	3	.9791	.0203	.0180	.0084	.0008	.0199	.9054
29	3	.9733	.0176	.0171	.0013	.0010	.0172	.9955
30	4	.9703	.0459	.0407	.0007	.0180	.0445	.9143
31	3	.9720	.0140	.0110	.0080	.0006	.0136	.8079
32	3	.9911	.0192	.0171	.0083	.0006	.0190	.8992

TAXAS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

--NB---THDV(%)---TDHI(%)--

	THDV(%)	TDHI(%)
1	.017	6.678
2	1.873	1.579
3	2.442	2.442
4	3.040	3.040
5	2.989	2.989
6	2.966	2.217
7	2.959	2.513
8	3.474	3.474
9	3.921	3.737
10	3.914	1.359
11	3.907	2.169
12	4.390	3.934
13	4.873	42.449
14	2.623	.865
15	2.601	2.477
16	2.601	.897
17	2.583	1.421
18	2.578	2.312
19	2.575	1.646
20	3.035	1.448
21	3.577	42.930
22	3.033	1.447
23	2.195	1.965
24	2.575	1.073
25	2.964	.976
26	3.361	2.883
27	3.363	.923
28	3.823	1.616
29	4.293	3.841
30	4.777	42.524
31	4.294	1.410
32	2.963	1.230

FUNDAMENTAL

--MODULO-- --ANGULO--

1.0550	.0000
1.0154	-2.7154
1.0020	-3.8936
.9894	-5.0563
.9812	-5.4818
.9752	-5.6351
.9736	-5.6833
.9757	-5.3555
.9636	-5.6047
.9578	-5.6400
.9551	-5.6830
.9589	-5.7664
.9557	-5.8848
1.0025	-3.6568
.9905	-3.8484
.9875	-3.8416
.9832	-3.9971
.9818	-4.0395
.9799	-4.0641
1.0003	-3.8500
.9966	-3.9831
.9983	-3.8720
1.0098	-3.0602
1.0006	-3.3273
.9924	-3.5742
.9861	-3.7891
.9839	-3.7540
.9783	-3.9542
.9724	-4.1089
.9692	-4.2273
.9711	-4.1034
.9907	-3.5844

TENSOES HARMONICAS
 TOLERANCIA 9.999999974752427E-007
 NºBARRA --MODULO-- --FASE(GRAUS)--

----HARMONICA DE ORDEM--- 3.000000

1	.0000895	-114.607
2	.0094049	-122.628
3	.0122213	-125.184
4	.0150563	-126.669
5	.0148523	-127.832
6	.0147247	-128.247
7	.0146903	-128.381
8	.0169506	-128.907
9	.0188914	-130.536
10	.0187618	-130.611
11	.0186902	-130.693
12	.0210128	-131.632
13	.0231806	-132.409
14	.0129255	-121.182
15	.0127330	-121.669
16	.0126961	-121.663
17	.0126035	-122.015
18	.0125803	-122.138
19	.0125427	-122.166
20	.0148075	-120.221
21	.0173488	-122.141
22	.0147703	-120.255
23	.0109078	-122.035
24	.0126315	-122.573
25	.0143761	-122.954
26	.0161584	-123.218

27 .0161293 -123.198

28 .0182391 -124.755

29 .0203691 -125.961

30 .0225686 -126.826

31 .0203446 -125.957

32 .0143478 -122.967

----HARMONICA DE ORDEM--- 5.000000

1 .0000842 -127.769

2 .0087970 -132.907

3 .0113628 -136.972

4 .0139668 -139.344

5 .0136749 -140.961

6 .0135102 -141.503

7 .0134652 -141.699

8 .0157036 -140.753

9 .0174721 -141.623

10 .0173408 -141.692

11 .0172629 -141.767

12 .0194231 -142.020

13 .0214275 -142.166

14 .0121253 -130.455

15 .0119045 -131.098

16 .0118702 -131.093

17 .0117508 -131.508

18 .0117203 -131.695

19 .0116780 -131.669

20 .0139584 -129.081

21 .0163395 -129.572

22 .0139196 -129.109

23	.0102357	-132.053
24	.0118690	-131.874
25	.0135234	-131.720
26	.0152162	-131.575
27	.0151899	-131.562
28	.0171391	-132.217
29	.0191025	-132.719
30	.0211396	-132.953
31	.0190799	-132.716
32	.0134957	-131.729

----HARMONICA DE ORDEM---- 7.000000

1	.0000797	-140.003
2	.0083126	-143.966
3	.0106751	-149.392
4	.0130992	-152.571
5	.0127414	-154.451
6	.0125485	-155.029
7	.0124930	-155.262
8	.0147499	-153.710
9	.0164280	-154.257
10	.0162993	-154.315
11	.0162207	-154.377
12	.0182968	-154.323
13	.0202334	-154.154
14	.0115085	-140.609
15	.0112665	-141.354
16	.0112341	-141.351
17	.0110982	-141.785
18	.0110592	-142.020

19	.0110199	-141.931
20	.0133082	-138.905
21	.0156148	-138.638
22	.0132699	-138.927
23	.0096972	-142.904
24	.0112705	-142.319
25	.0128656	-141.863
26	.0144988	-141.490
27	.0144740	-141.481
28	.0163438	-141.683
29	.0182264	-141.828

----HARMONICA DE ORDEM---- 9.000000

30	.0201962	-141.733
31	.0182050	-141.826
32	.0128388	-141.870
1	.0000802	-150.521
2	.0083627	-153.859
3	.0107161	-160.590
4	.0131627	-164.525
5	.0127388	-166.563
6	.0125157	-167.125
7	.0124476	-167.366
8	.0148611	-165.594
9	.0165866	-165.980
10	.0164543	-166.028
11	.0163722	-166.079
12	.0185270	-165.863
13	.0205552	-165.519
14	.0115795	-149.644

15	.0113059	-150.449
16	.0112736	-150.446
17	.0111189	-150.876
18	.0110689	-151.138
19	.0110348	-151.004
20	.0134285	-147.650
21	.0157838	-146.858
22	.0133894	-147.667
23	.0097895	-152.595
24	.0114166	-151.718
25	.0130673	-151.048
26	.0147578	-150.516
27	.0147328	-150.509
28	.0166665	-150.433
29	.0186137	-150.360
30	.0206684	-150.061
31	.0185919	-150.358
32	.0130399	-151.054
----HARMONICA DE ORDEM----		
1	.0000723	-162.963
2	.0075280	-165.911
3	.0095783	-173.891
4	.0117453	-178.583
5	.0113250	179.246
6	.0111066	178.714
7	.0110367	178.470
8	.0132768	-179.672
9	.0148327	-179.971
10	.0147130	179.989

11.0

11	.0146382	179.946
12	.0166004	-179.736
13	.0184631	-179.284
14	.0105195	-160.936
15	.0102467	-161.790
16	.0102174	-161.788
17	.0100643	-162.210
18	.0100099	-162.488
19	.0099851	-162.320
20	.0122636	-158.711
21	.0144743	-157.568
22	.0122274	-158.725
23	.0088209	-164.476
24	.0103018	-163.376
25	.0118053	-162.546
26	.0133456	-161.893
27	.0133230	-161.886
28	.0150867	-161.615
29	.0168630	-161.389
30	.0187528	-160.952
31	.0168432	-161.388
32	.0117806	-162.550

PERDAS ATIVAS 3.787668379793883E-002

Bibliografia

- [1] E. W., Kimbark, “ Direct Current Transmission ”, John Wiley & Sons, 1971.

- [2] IEEE Industry Applications Society / Power Engineering Society, “ IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, April 12, 1993.

- [3] J. Arrillaga, D.A Bradly ,P.S. Bodger, “ Power Systems Harmonics”, John Wiley & Sons, New York, 1985 .

- [4] Joseph A. Edminister, “ Circuitos Elétricos ”, Coleção Schaum, Editora Mc Graw-Hill do Brasil, 5ª reimpressão, 1978.

- [5] Aguinaldo de Marchi Lopes, “A Influência das Componentes Harmônicas na Compensação da Potência Reativa”, Artigo Apresentado no Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia, Uberlândia, julho de 1996.

- [6] E. Alexander, Emanuel, “ Constantin I. Budeanu ”, Proceedings of IEEE ICHIPS VI, Bologna, Italy, September 21-23, 1994.

- [7] Fabiana Pöttker, Ivo Barbi, “ Filtro Ativo Monofásico Para Correção do Fator de Potência de Cargas Lineares e Não-Lineares ”, INEP - UFSC, 1996.

- [8] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996 .

- [9] Ivo Barbi, “Eletrônica de Potência”, Editora da UFSC, Florianópolis, 1986 .

- [10] Cyril W. Lander, “Eletrônica Industrial Teoria e Aplicações”, Editora Mc Graw-Hill, 1988 .
- [11] Francisca Aparecida de Camargo Pires, “ Uma Contribuição ao Estudo de Harmônicas em Sistemas de Potência ”, Tese de Doutorado, UNICAMP, Fevereiro de 1991.
- [12] Yngve Sundberg, “ The arc furnace as a load on the network ”, ASEA JOURNAL, 1976, Volume 49, Number 4 .
- [13] Yngve Sundberg, “ The Power Circuit of Arc Furnace ”, ASEA JOURNAL, 1972, Volume 45, Number 3 .
- [14] E. Acha, N. Rajakovic, “A harmonic Domain Computational Package For Nonlinear Problems and Application to Electric ARCS ”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol .5, No 3, July 1990 .
- [15] Sigmar Deckmann, “Simulação de Forno a Arco Para Avaliação da Qualidade de Tensão Suprida”, UNICAMP, Artigo Apresentado no Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia, Uberlândia, julho de 1996.
- [16] Ivo Barbi, “ Correção do Fator de Potência Para Cargas Não Lineares”, Palestra realizada novembro de 1995, INEP - UFSC.
- [17] L. C. Origa de Oliveira, F. C. V. Malange, “Harmônicas em Sistemas de Compensação Estática Tipo RCT Considerando os Efeitos da Saturação Assimétrica do Transformador ”, UNESP, Artigo Apresentado no Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia, Uberlândia, julho de 1996.
- [18] Wenyan Xu, Marti J. R., “A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No.1, February 1991.

- [19] W. Song, G. T. Heydt, " The Integration of HVDC Subsystems into the Harmonic Power Flow Algorithm ", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-103, No. 8, August 1984 .
- [20] Dorel S. Ramos, Eduardo M. Dias, " Sistemas Elétricos de Potência - Regime Permanente ", Editora Guanabara Dois, Volume 2, 1983.
- [21] H.W. Dommel, A. Yan, Shi Wei, "Harmonics From Transformers Saturation ", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, April 1986.
- [22] Rory Dwyer, Robert K. Mc Clusky, " Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, November 1995.
- [23] - Williamson, " The effects of system harmonics upon machines ", An International Conference on Hramonics in Power Systems, UMIST, Manshester, England 1-2 September 1981, pp 85-101.
- [24] J.F. Fuller, E.F. Fuchs, " Influence of Harmonics on Power Distribution System Protection", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 3, no 2, pp 549 - 557, April 1988.
- [25] P. M. Silveira, A. M. Lemos, " Sistema de Proteção e Controle versus Qualidade da Energia Elétrica", EFEI, Artigo Apresentado no Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia, Uberlândia, julho de 1996.
- [26] - Aly A. Mahmoud, Richard D.Smultz, "A Method For Analyzing Harmonic Distribution In A.C. Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and, Vol.pas -101, No. 6 June 1982 .
- [27] - W. D. Stevenson, Jr., "Elements of Power Systems Analysis", Second, McGraw-Hill, New York , 1962 .

- [28] - P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", Iowa State University, LA, 1976 .
- [29] - João Pedro Assumpção Bastos, "Eletromagnetismo e Cálculo de Campos", Editora da UFSC, Florianópolis, 1989 .
- [30] - W. J. McNutt, T. J. Blalock, "Response of transformer windings to systems transient voltages", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-93, Marsh/April 1974.
- [31] - CIGRE Working Group 36-05 (CCO2) 1996, "GUIDE FOR ASSESSING THE NETWORK HARMONIC IMPEDANCE", Electra , (n° 167), 97-131.
- [32] - CIGRE Working Group 36-05 (Disturbing Loads) 1981, "Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimating of existing values in the network". Electra, (n° 77), 35-54.
- [33] - P. M. Anderson, " Analysis of Faulted Power Systems, Iowa State University Press" , Ames, IA, 1976.
- [34] - A. Semlyen, J. F. Eggleston and J. Arrillaga, "Admittance Matrix Model of a Synchronous Machine for Harmonic Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol . PS-2, Nov. 1987, pp. 833 - 840 .
- [35] - G. J. Berg, M. M. Abdel Hakim, "Dynamic single unit representation of induction motor groups", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, January/February, 1976.
- [36] - D. XIA and G.T. HEYDT, "Harmonic Power Flow Studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, n° 6, June 1982 .

[37]- D. Shinmohammadi, H.W. Hong , Semlyen, A., Luo., G. X., “A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network”, IEEE Transaction on PS, Vol.3, No.2, pp 753-762, May 1988.