

AVALIAÇÃO DA AÇÃO CONJUNTA DE CARGAS HARMÔNICAS EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES DE DISTRIBUIÇÃO

REGINA M. LIMA NETA¹, MANOEL. A. CARVALHO JR¹, MILDE M. S. LIRA¹

¹*Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - 50670-901
Recife, Pernambuco, Brasil*

E-mails: regina.mlneta@gmail.com, macj@ufpe.br, milde@ufpe.br

JOSÉ M. GURGEL NETO², ALEXSANDRO A. P. DA SILVA²

²*Centro Universitário CESMAC - AL
Rua Cônego Machado, 918, Farol CEP: 57051-160, Maceió, Alagoas
E-mails: neto.gurgel.moraes@gmail.com, alexsandro.aleixo@yahoo.com*

Abstract— This work has the objective to analyze the joint action of the harmonic loads in Voltage unbalance in distribution networks, which will lead to the appearance of the harmonics of third order in hand Δ for distribution transformers, such can cause damage to electrical equipment. It was studied a typical feeder of 13.8 kV and it was considered the contribution harmonic for residential and commercial consumers, electric vehicles and distributed generation through its modeling in ATPDraw software.

Keywords— ATP, Power Quality, Distributed Generation, Electrical Cars, Harmonics

Resumo— Este trabalho tem o objetivo de analisar a ação conjunta das cargas harmônicas no desequilíbrio de tensão nas redes de distribuição, o que provoca o aparecimento de harmônicos de terceira ordem no lado Δ dos transformadores de distribuição, os quais podem causar danos nos equipamentos elétricos. Analisou-se um alimentador típico de 13,8 kV e considerou-se a contribuição harmônica de consumidores residenciais e comerciais, veículos elétricos e geração distribuída através de sua modelagem no software ATPDraw.

Palavras-chave— ATP, Qualidade de Energia, Geração Distribuída, Veículos Elétricos, Harmônicos.

1 Introdução

O conceito de redes elétricas inteligentes tem sido utilizado, em escala piloto, por distribuidoras de energia de todas as regiões do país, principalmente em regiões metropolitanas. Nesse contexto, a geração distribuída (GD) surgiu como uma forma de aliviar a sobrecarga no sistema de geração hidrelétrica e termelétrica.

Além disso, o desenvolvimento de veículos elétricos (VEs) atingiu nos últimos anos, um grau jamais imaginado de importância técnica e estratégica, principalmente, devido às fortes pressões da sociedade atual para a redução da poluição ambiental advinda do uso de combustível fóssil. Uma das desvantagens é o aumento dos harmônicos nas redes elétricas devido à eletrônica de potência dos carregadores (FARMER *et al.*, 2010).

A inserção dos VEs e das GDs em conjunto com as cargas eletrônicas dos consumidores pode representar um novo desafio para o sistema de energia elétrica, especialmente para a rede de distribuição, onde ambos estarão diretamente conectados. A questão chave é descobrir como o sistema elétrico verá o acréscimo em suas cargas totais.

É comprovadamente aceito no meio científico, que uma das justificativas para a utilização dos transformadores de distribuição com ligação Δ -Y seria eliminar os harmônicos múltiplos do terceiro no

lado Δ . No entanto, essa afirmação só é válida quando as tensões trifásicas encontram-se perfeitamente equilibradas.

Tendo em vista que por mais que as distribuidoras de energia elétrica tentem repartir as cargas monofásicas de maneira uniforme nas três fases dos transformadores, quase nunca isso ocorre na prática. Daí o desequilíbrio de tensão no final do alimentador pode não estar dentro do limite de 2% estipulado pela ANEEL para o barramento de média tensão (ANEEL, 2011).

Portanto, é importante avaliar os impactos da possível presença de correntes harmônicas monofásicas na rede elétrica, produzidas pelos circuitos eletrônicos e que podem causar efeitos indesejáveis na rede de distribuição.

O objetivo dos estudos harmônicos é quantificar a distorção na forma de onda da tensão e da corrente em vários pontos da rede de distribuição, para garantir o seu correto funcionamento.

De forma similar a outros estudos do sistema elétrico, a análise harmônica consiste dos seguintes passos (RANADE & XU, 2007):

- Definição dos equipamentos geradores de harmônicos e determinação dos modelos para suas representações;
- Determinação dos modelos para representar os outros componentes do sistema incluindo redes externas;
- Simulação do sistema em várias situações.

Como estudo de caso, avaliou-se um alimentador de 13,8 kV com a ferramenta computacional ATPDraw.

2 Modelagem da Rede de Distribuição

2.1 Gerador

O gerador ainda não possui um modelo plenamente aceito pelo meio científico para estudo harmônico. De forma geral, é assumido que geradores síncronos não produzem tensões harmônicas, portanto, eles podem ser representados por uma impedância. A referência (DENSEM et. al, 1984) propõe um circuito equivalente para retratar os geradores, conforme Figura 1.

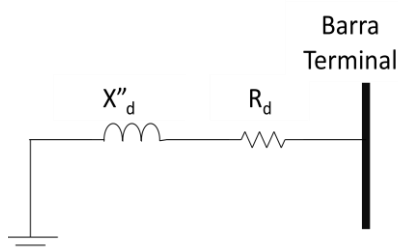


Figura 1. Modelagem do Gerador para Estudo Harmônico

Em que X''_d representa a reatância subtransitória e R_d a resistência interna da máquina. Esta última expressa na equação (1).

$$R_d = \frac{X''_d}{4,9} \quad (1)$$

2.2 Transformadores

A correta modelagem dos transformadores é fundamental para a análise harmônica de um sistema de distribuição. Existem diversos modelos de transformadores utilizados para diversas finalidades que vão desde a análise em regime permanente (análise de fluxo de potência) até estudos transitórios (análise de descargas atmosféricas).

É importante considerar a inclusão das características não lineares do núcleo para estudos de harmônicos RANADE & XU (2007) e NUNES (2007), pois, a influência da corrente de magnetização em relação à corrente nominal do transformador aumenta exponencialmente ao desequilíbrio de tensão, como quantificado por (MELLO, 1988).

Dessa forma, utilizou-se o modelo do transformador saturado, como ilustrado na Figura 2, informando-se a curva $V \times I$ a partir dos dados nominais do transformador (LIRA, 2015).

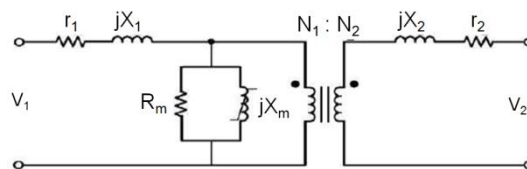


Figura 2. Modelo do Transformador para Estudo Harmônico

2.3 Linhas de Distribuição

Sendo o principal meio utilizado para a interconexão dos dispositivos que compõem um sistema elétrico, as linhas de distribuição são caminhos naturais para a propagação de distorções harmônicas pela rede. Portanto, devem ser adequadamente representadas a fim de obter com precisão os fluxos de harmônicos.

A análise do comportamento das linhas de distribuição, seja em regime permanente ou transitório, depende da utilização de um modelo apropriado.

O efeito do solo deve ser considerado no cálculo dos parâmetros, pois, sua presença altera as distribuições dos campos eletromagnéticos gerados pelas correntes nos condutores. Assim, pressupõe-se que na ocorrência de componentes harmônicas existirão correntes de condução pelo solo.

Considerando que o sistema a ser modelado possui um grande número de vãos com comprimentos pequenos, a simulação utilizando tanto o modelo de J. Marti quanto Bergeron (modelos cujos parâmetros de linha variam com a frequência) seria impraticável, devido ao elevado esforço computacional.

Por intermédio de uma análise da resposta em frequência de uma linha de 1 km com o modelo mais completo (J. Marti) e o mais simples (PI equivalente distribuído), verificou-se uma diferença significativa de 16% em 6,4 kHz, vide Figura 3.

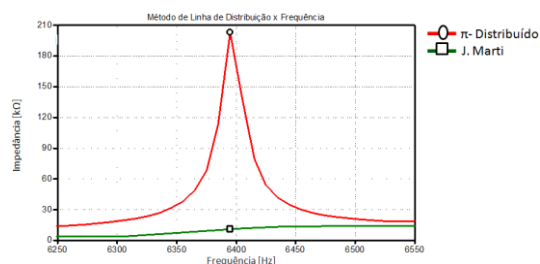


Figura 3. Resposta em frequência de uma linha nos modelos PI distribuído e J Marti

Como o maior comprimento de linha no alimentador estudado foi de 0,85 km, considerou-se uma boa aproximação utilizar o modelo distribuído, esse que considera a resistência, a reatância série e a capacitância shunt por unidade de comprimento.

Para análise em frequência, a condutância transversal da linha não pode ser ignorada, devido à influência na impedância harmônica equivalente (LIRA, 2014). Nos modelos de linhas disponíveis no

ATPDraw, a condutância é definida por um número padrão. Desta forma, empregou-se a condutância calculada em shunt com o modelo a parâmetros distribuídos.

A modelagem completa da linha para simulação está apresentada na Figura 4.

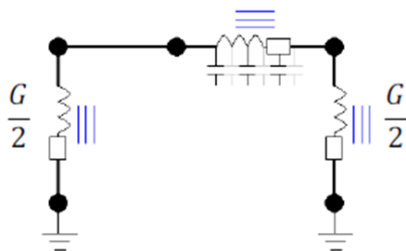


Figura 4. Modelo da linha de distribuição para estudo harmônico

3 Modelagem das Cargas Harmônicas

3.1 Considerações Básicas

A modelagem de cargas harmônicas é tema recorrente em diversos estudos da literatura. Para análises de harmônicos, é suficiente modelar tais cargas por fontes de corrente desde que os níveis de distorção de tensão simulados sejam inferiores a 10% (GONZALEZ, 2006).

A modelagem é feita de tal forma que parte fundamental e parte harmônica estejam separadas. Enquanto a parcela a 60 Hz é representada por meio de uma associação de uma resistência e uma indutância ou capacitância, as componentes harmônicas são representadas por N fontes de corrente; sendo N o número de harmônicos produzidos pela carga, onde cada fonte injeta um harmônico de uma determinada ordem (NUNES, 2007).

Neste trabalho, optou-se pela modelagem da carga fundamental em circuito paralelo que a depender do fator de potência pode ser indutivo ou capacitivo, como mostrado na Figura 5.

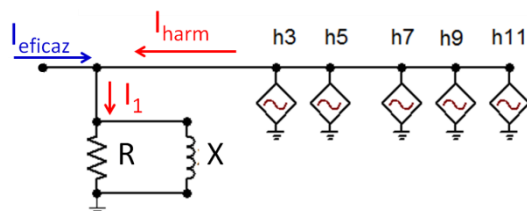


Figura 5. Modelo da carga harmônica

Em que, h_N representa a fonte de corrente do harmônico N , e o ramo paralelo R e X representa a componente fundamental da carga. A corrente eficaz solicitada pela carga constitui-se da soma da corrente a 60 Hz com as correntes harmônicas.

Para caracterizar o comportamento harmônico

das cargas próprias do alimentador analisado, foram utilizados dados de medição do perfil harmônico (com módulo e ângulo) de consumidores típicos residenciais, comerciais e iluminação pública (LIRA, 2015).

3.2 Veículo Elétrico

As atuais tecnologias de conversão AC/CC têm sido desenvolvidas visando à redução de correntes harmônicas, um alto fator de potência, baixas interferências eletromagnética e por rádio frequência na entrada AC, boa regulação e alta qualidade da tensão CC de saída para alimentar cargas.

Devido às exigências de qualidade de energia no ponto de acoplamento comum (PAC) de inserção do VE na rede elétrica, são usados mecanismos em conjunto com o retificador para melhorar o seu desempenho harmônico e aumentar a eficiência total. O conversor CC/CC Boost e suas variações são muito utilizados com esta finalidade, onde as técnicas de controle por modulação de largura de pulso (*pwm*) e por corrente de histerese são utilizadas por meio de realimentação no controle da corrente de entrada e da tensão de saída do carregador.

No modelo utilizado neste trabalho o carregador é composto por quatro conversores: dois retificadores, um conversor CC/CC Boost, um inversor e um transformador isolador (GRENIER, 2009).

O diagrama esquemático em blocos desta topologia pode ser visto na Figura 6.

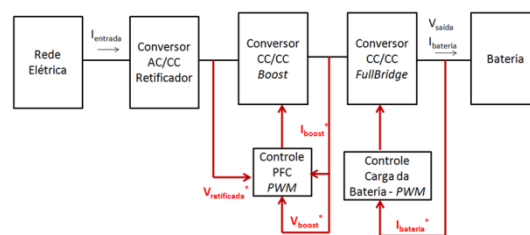


Figura 6. Diagrama em Bloco de Carregador com PFC e Full Bridge

O circuito elétrico deste carregador está detalhado na Figura 7.

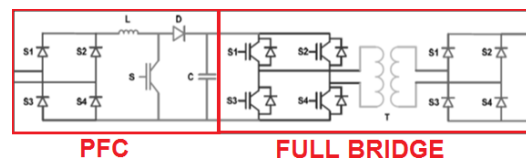


Figura 7. Modelo de Carregador de Bateria com PFC e Full Bridge

A Tabela 1 descreve as características elétricas do carregador utilizado, com potência de 3,7 kW.

Tabela 1. Especificações do Carregador de Veículo Elétrico

Grandeza	Valor
Tensão de Entrada	310 V _{pico}
Frequência da Rede	60 Hz
Potência de Saída	3,7 kW
Corrente de Carga	16 A _{rms}
Ripple de Tensão	3%
Ripple de Corrente	20%
Tensão da Bateria	278 V

A Figura 8 mostra a forma de onda da tensão na saída do carregador, onde se verifica que a tensão média de carregamento da bateria tem o valor de 278 V, conforme especificação do modelo do carregador utilizado neste trabalho.

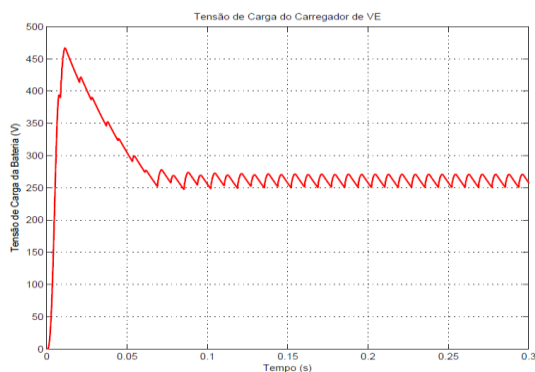


Figura 8. Tensão de saída do Carregador

O perfil harmônico do carregador de veículo elétrico modelado é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Perfil Harmônico do Veículo Elétrico

Ordem do Harmônico	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100	5,0
3	21,52	209,1
5	4,09	155,0
69	1,17	209,6
71	2,17	203,4
THDi = 22,3% I _{rms} = 16 A		

3.3 Geração Distribuída

Como fonte de geração distribuída utilizou-se uma central solar com capacidade 400 kW_{pico} e conectada à rede de distribuição. O diagrama unifilar da usina no ponto de conexão é ilustrado na Figura 9.

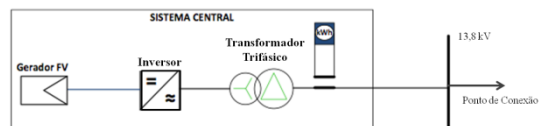


Figura 9. Esquema Básico da Central Solar

Para a modelagem desta geração distribuída, efetuou-se a injeção de corrente harmônica no local de instalação, sabendo que os valores característicos de harmônicos predominantes ocorrem em altas frequências devido ao chaveamento *pwm*.

Considerando-se um inversor trifásico com chaveamento *pwm* e frequência de comutação de 2,7 kHz, valor típico para esse tipo de conversor. Analisou-se apenas o impacto dos harmônicos cujas amplitudes eram maiores que 1% da fundamental.

Segundo dados fornecidos pela literatura, os valores típicos de potência de central solar de 400 kW_{pico} no horário de 12 h (horário de maior incidência solar durante o dia) constitui-se de 420,6 kVA, com tensão de 13,8 kV e corrente eficaz de 17,6 A (LIRA, 2015).

Sendo assim, o espectro harmônico do conversor solar obtido para esta condição é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Perfil Harmônico da Usina Fotovoltaica

Ordem do Harmônico	Módulo (%)	Ângulo (°)
1	100	161,9
43	8,10	92,8
47	7,40	92,2
89	5,60	89,3
91	5,49	269,1
THDi = 14,1% I _{rms} = 17,6 A		

4 Resultados

O alimentador analisado possui extensão de 5,29 km, com topologia radial, 13 barras na média tensão, 13 transformadores abaixadores 13,8/0,38 kV Δ-Y aterrado, totalizando 113 consumidores entre residenciais, comerciais, rurais e prédios públicos (LIRA, 2015).

A partir das modelagens dos componentes da rede de distribuição foram monitorados os harmônicos no lado de 13,8 kV (distribuição) ao longo do alimentador em função do desequilíbrio de tensão quando ocorre a inserção das cargas harmônicas nos secundários dos transformadores de distribuição, conforme Figura 10.

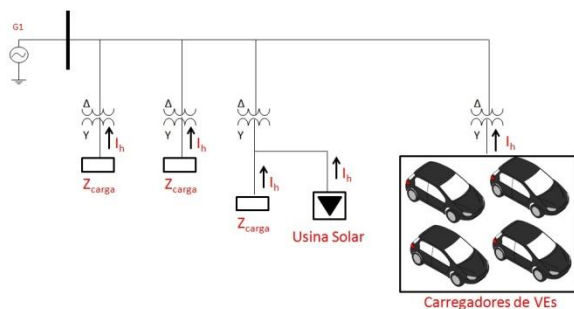


Figura 10. Diagrama Unifilar do sistema analisado

Foi considerado um quantitativo de 100 VEs inseridos ao longo do alimentador.

O desequilíbrio de tensão foi inserido através da modificação na tensão da barra infinita no início do alimentador, considerando-se que o fator de desequilíbrio exprime a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão expressa em termos percentuais da componente de sequência positiva, vide equação (2).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100\% \quad (2)$$

4.1 Análise da Tensão

O comportamento do terceiro harmônico na forma de onda da tensão no lado de 13,8 kV, ligação em Δ , é apresentado na Figura 11.

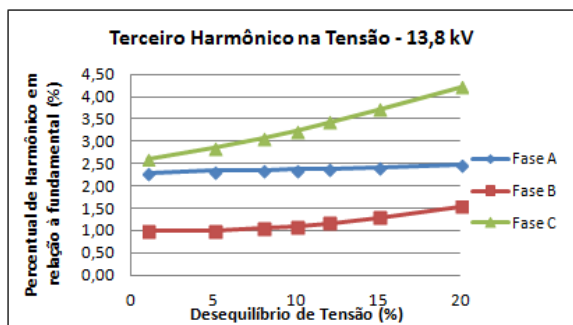


Figura 11. Terceiro harmônico na tensão no lado Δ

Verifica-se um crescimento do terceiro harmônico com o aumento do desequilíbrio, onde a fase C atingiu o patamar de 4,2% com um desequilíbrio de 20%.

Fica comprovado, assim, que apesar da ligação Δ -Y dos transformadores, harmônicos múltiplos do terceiro são injetados na média tensão em condições de desequilíbrio, de forma crescente conforme crescimento da assimetria entre as fases.

O gráfico das tensões nas fases A, B e C no final do alimentador devido somente a frequência fundamental de 60 Hz, em função do desequilíbrio de tensão pode ser observado na Figura 12.

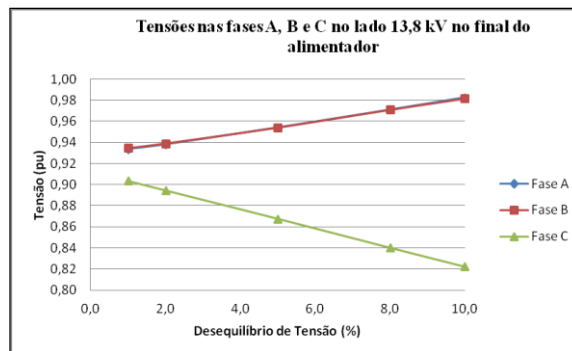


Figura 12. Tensão nas fases A, B e C em 60 Hz no lado 13,8 kV no final do alimentador em função do Desequilíbrio de Tensão na rede elétrica

Nota-se que a tensão na fase C decresceu consideravelmente, atingindo o valor de 0,82 pu, muito abaixo do permitido pela legislação vigente de 0,95 pu, enquanto tanto na fase A quanto na fase B a tensão cresceu para 0,98 pu com desequilíbrio de tensão de 10%.

4.2 Análise da Corrente

O comportamento do terceiro harmônico na forma de onda da corrente no lado de 13,8 kV, ligação em Δ , é apresentado na Figura 13.

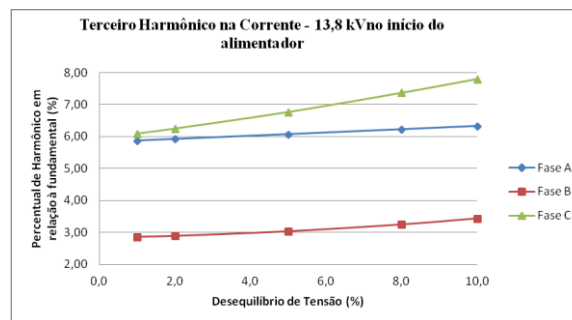


Figura 13. Terceiro harmônico na corrente no lado Δ

Em relação ao observado com a forma de onda da tensão, verifica-se que com a corrente, as distorções harmônicas têm maiores proporções, onde a fase C atingiu o patamar de 8,0 % com um desequilíbrio de 10%, a fase A 6,33% e a fase B 3,43%.

5 Conclusão

Os desequilíbrios de tensão nas redes de distribuição não somente advém da desorganização das cargas nas fases, mas também ocorrem pela ação conjunta de todas as cargas harmônicas presentes no sistema elétrico atual, através dos processos de retificação/conversão das cargas de consumidores, geração distribuída e veículos elétricos.

Conclui-se que apenas o tipo usual de ligação Δ -Y dos transformadores de distribuição não é suficiente para deter a circulação das correntes harmônicas de ordem três em sistemas elétricos desequilibrados, mostrando assim a importância de que haja o monitoramento eficaz dos harmônicos nas redes de distribuição para que graves problemas do setor elétrico sejam evitados no futuro.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Centro Universitário Cesmac, pelo suporte, ajuda essencial no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, Resolução 505, PRODIST, 2011.
- DENSEM, T. J., BODGER P.S. & ARRILLAGA J. "Three Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, nº. 2, February 1984.
- DUGUI W. & ZHENG, X. "Harmonic Model of Power Transformer". International Conference on Power System Technology – POWERCON'98, Beijing, 1998.
- FARMER, C.; HINES, P.; DOWDS, J.; BLUMSACK, S. *Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure*, 43rd Hawaii international conference on system sciences, pp. 1– 10, 2010.
- GONZALEZ, M. L. "Estimativa de Distorções Harmônicas Geradas por Consumidores Residenciais". XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI, 21-25 de Agosto de 2006, Belo Horizonte, MG.
- GRENIER, M. "Design of an On-board Charger for Plug-in Hybrid Electrical Vehicle (PHEV)". Göteborg, Sweden, 2009. Dissertação de M.Sc. – Chalmers University Of Technology.
- LIRA, M. M. S., NETA, R. M. L., CARVALHO JR., M. A., SOUZA, A. G., MATIAS, I. R., LOPES J. A. e COSTA, S. M.. "Influência da Condutância Transversal na Impedância Harmônica Equivalente do Sistema". SBSE – 2014.
- LIRA, M. M. S., NETA, R. M. L., CARVALHO JR., M. A., SOUZA, A. G., PESSOA, L. L., LOPES J. A. e COSTA, S. M.. "Análise dos Impactos do Carregamento de Veículos Elétricos na Qualidade de Energia – Estudo de Caso: Ilha de Fernando de Noronha". CITENEL – 2015.
- MELLO, C. A. F.. "Efeitos das Tensões e Correntes Harmônicas sobre o Sistema Elétrico e seus Componentes", Dissertação de Mestrado nº 51, CPDEE, UFMG, 1988.
- NUNES, R. V.. "Análise da Penetração Harmônica em Redes de Distribuição Desequilibradas Devido às Cargas Residenciais e Comerciais com a Utilização do ATP". Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007. Dissertação de Mestrado – CPDEE/ Universidade Federal de Minas Gerais.
- RANADE, S. J & XU, W. An Overview Of Harmonics Modeling And Simulation. In: "IEEE Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation". 2007. Cap. 1. pp. 1-6.