

Influência de correntes harmônicas em estudos de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica

Renan Souza Moura*. Valter Garcia**. Paulo Raimundo Gomes de Lima***.
Antonio Carlos Zambroni de Souza****

**Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Formiga, Formiga, Brasil (e-mail: renan.moura@ifmg.edu.br).*

***Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Formiga, Formiga, Brasil (e-mail: vltrgarcia@gmail.com).*

*** *Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Formiga, Formiga, Brasil (e-mail: paulolima.5454@gmail.com).*

*****Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil (zambroni@unifei.edu.br).*

Abstract: The use of equipments based on power electronics, for the purpose of some control, may provide non-sinusoidal electrical currents to electrical systems. Depending on how distorted this non-sinusoidal waveform is, problems such as improper conductor heating, counter-rotating magnetic torque on rotating machinery, improper actuation of protective equipment, and other phenomena, may occur and even result in a unacceptable voltage levels. Within this context, this paper demonstrates the influence of harmonic currents in voltage stability in power distribution systems. More precisely, the QV curve, which describes the relationship between reactive power and voltage level, will be adapted for electrical distribution systems and it obtained without and with the presence of harmonic currents. The results demonstrated that harmonic currents decrease the reactive power margin provided by the QV curve in an IEEE test system with all operation limits considered.

Resumo: A utilização de equipamentos baseados em eletrônica de potência, com a finalidade de efetuar algum tipo de controle, pode fornecer correntes elétricas não-senoidais para os sistemas elétricos. Dependendo do quanto distorcida é esta forma de onda não senoidal, problemas como o aquecimento indevido de condutores, torque magnético contrário ao sentido de rotação em máquinas rotativas, atuações indevidas de equipamentos de proteção, entre outros fenômenos, podem ocorrer e ainda resultar em níveis de tensão indesejáveis. Dentro deste contexto, este artigo demonstra a influência de correntes harmônicas em estudos de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. Mais precisamente, a curva QV, que descreve a relação entre a potência reativa e o nível de tensão, será adaptada para os sistemas de distribuição de energia elétrica e obtida sem e com a presença de correntes harmônicas. Os resultados demonstraram que correntes harmônicas diminuem a margem de potência reativa fornecida pela curva QV em um sistema teste do IEEE com todos os limites operacionais considerados.

Keywords: Voltage stability; Power quality; Electricity distribution systems.

Palavras-chaves: Estabilidade de tensão; Qualidade de Energia Elétrica; Sistemas de distribuição de Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Estudos relacionados com sistemas de distribuição de energia têm crescido nos últimos anos, pois a busca de novas técnicas tem auxiliado os operadores a manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica (Maykot et al., 2019). Tal continuidade deve ser realizada com níveis adequados de tensão, o que resulta em um atendimento da carga elétrica sob fator de potência apropriado (Júnior et al., 2019).

O comportamento de um sistema sob o ponto de vista de tensão após a ocorrência de um distúrbio é analisado pela área de estabilidade de tensão (Kundur et al., 2004). Um distúrbio é qualquer ação que altera o ponto de equilíbrio de um sistema como o aumento gradual de cargas, a variação de tapes de transformadores, curtos circuitos, entre outras. (Albuquerque et al., 2009; Moura et al., 2016)

As modificações propostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica têm causado uma maior complexidade operacional dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2019). Como consequência, ferramentas utilizadas na análise de estabilidade de tensão para a área de transmissão/geração têm sido adaptadas para os sistemas de distribuição, como as curvas PV e QV (Pujara et al., 2011; Bujal et al., 2014). A curva QV, objeto de estudo deste artigo, indica o suporte de potência reativa que determinado barramento consegue fornecer para o sistema elétrico (Moura et al., 2016).

Outro fator que tem deixado mais complexo a operação de um sistema de distribuição é a inserção de dispositivos de controle baseados em eletrônica de potência. Estes equipamentos, utilizados normalmente no acionamento de máquinas elétricas, podem injetar formas de onda de correntes elétricas não senoidais na rede elétrica (Hart, 2012). Tais correntes não senoidais, que podem ser caracterizadas pela modelagem de

correntes harmônicas, diminuem a eficiência e a qualidade de energia elétrica do sistema de distribuição de energia (Dugan, 2012).

Dentro deste contexto, este artigo analisa a influência de correntes harmônicas dentro de um estudo de estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. De forma mais específica, as próximas seções demonstrarão o comportamento da curva QV sem e com a presença de correntes harmônicas.

A divisão deste artigo é a seguinte: após uma breve contextualização do problema na Seção 1, a Seção 2 é responsável por apresentar o referencial teórico de forma que o leitor possa entender a metodologia presente na Seção 3. Os resultados obtidos por este artigo e as suas conclusões estão indicados nas seções 4 e 5, respectivamente, para que em seguida sejam apresentadas as seções de Agradecimento e Referências.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresentará os conceitos básicos para um melhor entendimento do artigo.

2.1 Formulação matemática do fluxo de potência não harmônico

O ponto operativo de um sistema de distribuição de energia elétrica pode ser obtido através do cálculo de fluxo de potência. Este cálculo permite determinar os níveis de tensão em todos os barramentos do sistema, assim como todas as potências transmitidas, geradas e consumidas.

Neste artigo, o método de varredura apresentado por Kersting é utilizado para calcular o fluxo de potência, pois apresenta uma boa robustez numérica em sistemas radiais, com linhas não transpostas e que necessitam de uma modelagem trifásica dos componentes presentes nos sistemas de distribuição de energia elétrica (Kersting, 2017; Trevino, 1970).

2.2 Curva QV e suas características gerais

Uma curva QV relaciona o nível de tensão de um barramento em função da sua potência reativa injetada, conforme ilustrado pela Figura 1. Quando um ponto operativo se encontra na região estável da curva QV, um aumento de potência reativa resulta em um aumento do nível de tensão, o que é um comportamento esperado quando se insere um capacitor no sistema elétrico, por exemplo. Operar na região instável da curva QV deve ser evitado, como evidenciado por (Marujo et al., 2015), que propõe uma forma de alterar o ponto operativo de instável para estável na curva QV.

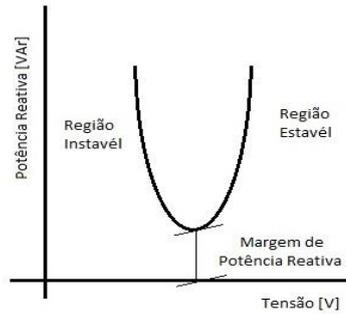


Fig. 1 Curva QV genérica

A curva QV para sistemas de distribuição é confeccionada de maneira semelhante a curva QV para os sistemas de transmissão/geração de energia elétrica (Bujal et al., 2014). Ou seja, cada ponto da curva QV é obtido através de um cálculo de fluxo de potência e após a obtenção deste ponto, existe uma variação da tensão especificada do barramento e um novo cálculo de fluxo de potência é executado. O processo para traçar curvas QV é finalizado quando existe divergência no cálculo de fluxo de potência.

2.3 Modelagem matemática do fluxo de potência devido a presença de correntes harmônicas

Para cada frequência harmônica analisada, deve-se efetuar uma correção das impedâncias do sistema, conforme descrito por (Zamboni et al., 2016), e indicado por (1) e (2):

$$R_h = R_1 \times \sqrt{h} \quad (1)$$

$$X_{Lh} = X_{L1} \times h \quad (2)$$

Sendo h a ordem harmônica, R_h é a resistência na ordem harmônica h , X_{Lh} é a reatância indutiva na ordem harmônica h , R_1 é resistência na ordem harmônica fundamental ($h = 1$ que corresponde a $f = 60$ Hz) e X_{L1} é a reatância indutiva na ordem harmônica fundamental ($h = 1$ que corresponde a $f = 60$ Hz).

O efeito capacitivo existente entre a linha e o potencial terra é ignorado devido ao fato que apresentam valores da ordem de 10^{-6} no sistema teste de distribuição de energia elétrica.

Os módulos dos fasores das correntes harmônicas são especificados em função dos módulos dos fasores das correntes fundamentais em valores percentuais, conforme indicado pela Tabela 1.

Após a correção das impedâncias e especificação da corrente do sistema para determinada ordem harmônica h , foi realizado um cálculo de fluxo de potência utilizando a técnica de varredura de forma semelhante à realizada por (Kersting, 2017).

Tabela 1- Porcentagens do módulo das correntes harmônicas em função do módulo da corrente fundamental.

Harmônico	Porcentagem	Sequência
2	10,00	Negativa
4	9,30	Positiva
5	8,95	Negativa
7	8,25	Positiva
8	7,90	Negativa
10	7,20	Positiva
11	6,85	Negativa
13	6,15	Positiva
14	5,80	Negativa
16	5,10	Positiva
17	4,75	Negativa
19	4,05	Positiva
20	3,70	Negativa
22	3,00	Positiva
23	2,65	Negativa
25	1,95	Positiva

2.4 Proposta de cálculo da curva QV com a presença de correntes harmônicas

O módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica, na seção 4 (ANEEL, 2018), define Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT%) conforme (3):

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum V_h^2}}{V_1} \quad (3)$$

Sendo h para todas as ordens harmônicas de 2 até a ordem harmônica máxima, $h_{máx}$. Baseado nesta definição, este artigo propõe que os valores de tensão (V_T) e potência reativa (Q_T), que formam a curva QV com a presença de correntes harmônicas, sejam calculados de acordo com (4) e (5).

$$V_T = \sqrt{\sum |V_h|^2} \quad (4)$$

$$Q_T = \sqrt{\sum Q_h^2} \quad (5)$$

Em (4) e (5), as ordens harmônicas h são as indicadas pela Tabela 1 e a ordem harmônica fundamental, $|V_h|$ é o módulo do fasor de tensão obtido pelo fluxo de potência harmônico de ordem h e Q_h é a potência reativa obtida pelo fluxo de potência harmônico de ordem h .

3. METODOLOGIA

Os passos da metodologia para calcular as curvas QV sem e com a presença de correntes harmônicas são listados a seguir:

1. Cálculo do fluxo de potência para a frequência fundamental pelo método de varredura. Os pontos de tensão e potência reativa obtidos neste passo serão utilizados para confeccionar a curva QV sem a presença de correntes harmônicas.

2. Para o valor de corrente encontrado no passo 1, especificam-se as correntes harmônicas de acordo com a Tabela 1.
3. Para cada valor de corrente especificada, deve-se corrigir os valores de impedância do sistema elétrico conforme indicado por (1) e (2).
4. Para cada valor de corrente especificada pelo passo 2 e a sua corresponde correção de impedâncias definida pelo passo 3, deve-se calcular o fluxo de potência harmônico.
5. Os pontos da curva QV com a presença de correntes harmônicas são calculadas através de (4) e (5).
6. Para se obter novos pontos das curvas QV sem e com a presença de correntes harmônicas, deve-se repetir os passos 1, 2, 3, 4 e 5 para novos valores de tensões especificadas no barramento de geração para a frequência fundamental.
7. O processo se encerra quando não existe ponto operativo durante a execução do passo 1.

É importante enfatizar que se pretende calcular a curva QV para barramento de geração. Assim, o barramento de carga, considerado como “a fonte de correntes harmônicas”, apresenta tensão nula durante o cálculo do fluxo de potência harmônico para as ordens harmônicas indicadas na Tabela 1. Isto significa que os valores $|V_h|$ e Q_h utilizados em (4) e (5) estão fundamentados no princípio da superposição de efeitos.

4. RESULTADOS

A metodologia proposta é avaliada no “IEEE 4 Node Test Feeder”, cuja a representação do diagrama unifilar está indicada na Figura 2 (Kersting, 2017).

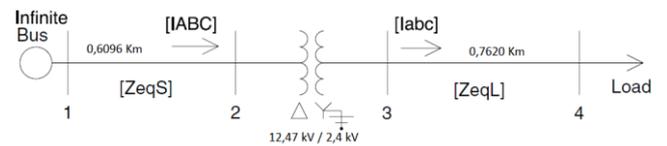


Fig. 2 Diagrama unifilar do sistema “IEEE 4 Node Test Feeder”.

As curvas QV sem e com presença de correntes harmônicas estão ilustradas pelas Figuras 3, 4 e 5 para cada fase do sistema analisado. É possível observar que a presença de correntes harmônicas reduz a margem de potência reativa fornecida pelas curvas QV. Ou seja, harmônicos além de causarem danos ao sistema conhecidos na Literatura Técnica, também afetam, dentro da área de estabilidade de tensão, a disponibilidade de potência reativa que um determinado barramento pode fornecer para o sistema.

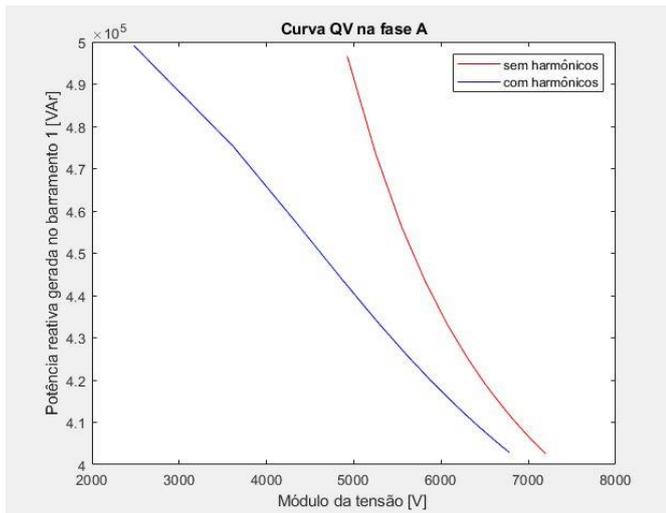


Fig. 3 Curvas QV sem e com a presença de correntes harmônicas para a fase A.

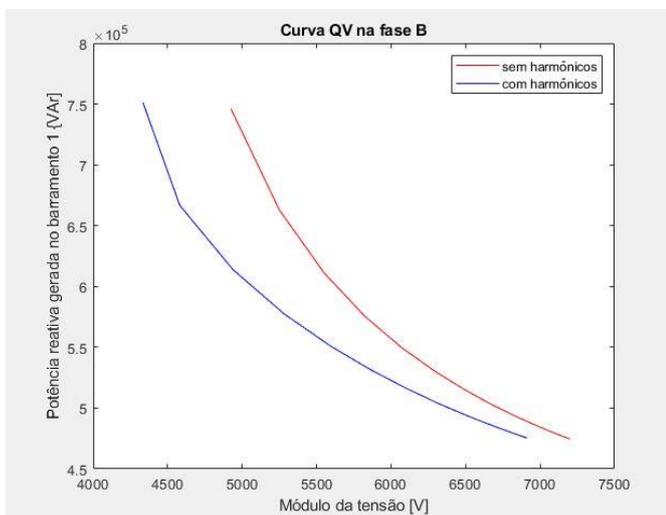


Fig. 4 Curvas QV sem e com a presença de correntes harmônicas para a fase B.

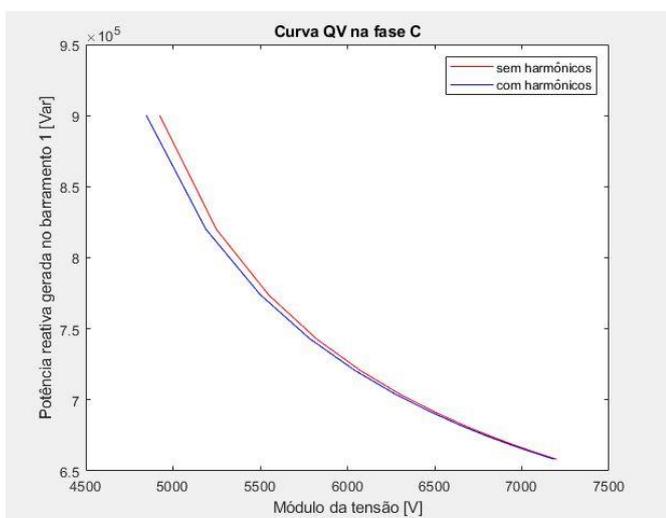


Fig. 5 Curvas QV sem e com a presença de correntes harmônicas para a fase C.

As Figuras 6, 7 e 8 demonstram no domínio do tempo as curvas de tensão para o primeiro e último ponto da curva QV com a presença de correntes harmônicas. É possível notar que mesmo que os valores percentuais indicados pela Tabela 1 sejam mantidos constantes durante o processo, estas curvas são diferentes, pois os módulos das correntes harmônicas dependem dos módulos das correntes fundamentais que, por sua vez, dependem dos valores de tensões especificadas no barramento de geração durante o cálculo de fluxo de potência.

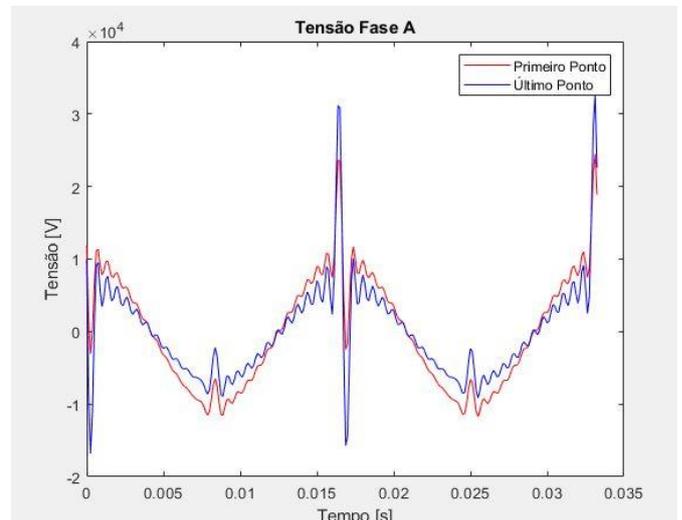


Fig. 6 Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de correntes harmônicas em diferentes pontos da Curva QV para a fase A.

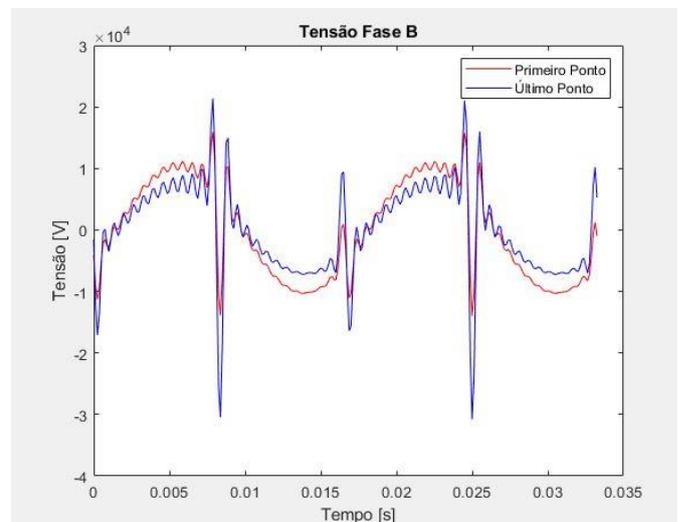


Fig. 7 Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de correntes harmônicas em diferentes pontos da Curva QV para a fase B.

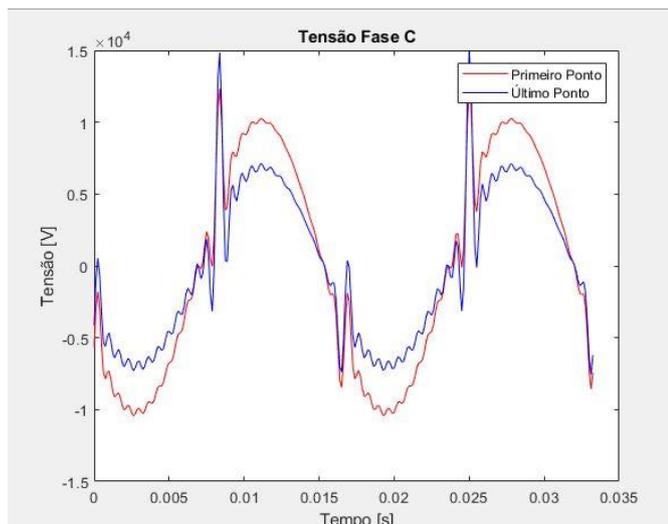


Fig. 8 Curvas de tensão no domínio do tempo com a presença de correntes harmônicas em diferentes pontos da Curva QV para a fase C.

5. CONCLUSÕES

Este artigo propôs uma forma de mensurar a influência de correntes harmônicas em um sistema de distribuição de energia elétrica dentro da área de estudo de estabilidade de tensão.

Os resultados demonstraram que a presença de correntes harmônicas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, além de causarem os danos já conhecidos na Literatura Técnica, também diminuem o suporte de potência reativa que um barramento pode fornecer para o sistema elétrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos setores de pesquisa da Universidade Federal de Itajubá e Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Formiga pelo suporte técnico e financeiro, respectivamente, para o desenvolvimento deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2018). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST, Módulo 8- Qualidade da Energia Elétrica*. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>, acesso realizado em 07 de dezembro de 2019.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (2019), “Revisão das regras de geração distribuída entra em consulta pública”, disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877, acessado em 07 de dezembro de 2019.
- Hart, D.W. (2012). *Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos*. AMGH, Porto Alegre, p. 496.
- Kersting, W.H. (2017). *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press, Quarta Edição, p. 546.

- Trevino, C. (1970). *Cases of difficult convergence in load-flow problems*. IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles.
- Pujara, A.J. and Vaidya, G. (2011). *Voltage stability index of radial Distribution network*. International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, Nagercoil, Índia, 23 a 24 de março de 2011.
- Bujal, N.R., Hasan, A.E. and Sulaiman, M. (2014). *Analysis of voltage stability problems in power system*. 4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship (ICE2T), Kuala Lumpur, Malásia, 27 a 29 de agosto de 2014.
- Maykot, A.S., Neto, E.A.C.A. and Oliva, N.A. (2019). *Priorização da automação de chaves manuais da rede de distribuição utilizando algoritmos genéticos*. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 10 a 13 de novembro de 2019.
- Dugan, R.C., Granaghan, M.F., Santoso, S. and Wayne H.B. (2012). *Electrical Power Systems Quality*. Tata McGraw Hill Education, Terceira Edição, p. 558.
- Júnior, A.A.S., Paula, F.A.S., Nascimento, M.L. and Leal, W.C.B. (2019). *Acompanhamento de Regulação de Tensão em Redes de Distribuição-13,8 kV*. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 10 a 13 de novembro de 2019.
- Moura, R.S., Zambroni de Souza, A.C., Lopes, B.I.L. and Mohn, F.W. (2016). *Effects of QV curves in the dynamic behavior of power systems*. IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, p. 2861-2870.
- Zambroni, M.F.S., Pereira, M.L., Silveira, P.M. and Ribeiro, P. (2016). *A MATLAB tool to study harmonics penetration in grid unbalanced conditions*. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Belo Horizonte, Brasil, 16 a 19 de outubro de 2016.
- Marujo, D., Zambroni de Souza, A.C., Lopes, B.I.L., Santos, M.V. and Kwok L.L. (2015). *On Control Actions Effects by Using QV Curves*. IEEE Transactions on Power Systems, volume 30, número 3.
- Albuquerque, V.O., Leme R.C., Lopes, B.I.L., Zambroni de Souza, A.C., Carpinteiro, O.A.S., Anjos, R.D. and Balestrassi, P.P. (2009). *A Quasi Dynamic Model Applied to a Ramp Load Increase Study*. IEEE Bucharest PowerTech, Bucareste, Romênia, 28 de junho a 2 de julho de 2009.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T. and Vittal, V. (2004). *Definition and Classification of Power System Stability*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2.