

Simulador para Estudos de Propagação Harmônica

Análise da Contribuição das Cargas não Lineares e das Redes Elétricas Operando sob Saturação

D. de S. Lima, R. L. de S. Carvalho, A. R. A. Manito, T. M. Soares, and U. H. Bezerra

Abstract— *The Brazilian electrical sector is facing major changes due to modernization of electrical equipment, which makes them compact and efficient, generating significant changes in operational profile of consumers due to the use of devices with power electronics. Non-linear loads have become one of the main agents responsible for power quality degradation of the electricity delivered to the consumers. Consequently, computational studies have become important as a way to identify possible consumer units which contribute significantly to the propagation of harmonics in the distribution grid. Therefore, this paper aims to demonstrate the use of a power quality tester for evaluation of the contribution of harmonic loads and the network itself to harmonic distortion in voltage. For this, we used the saturation curve of the power transformer. The representation of harmonic loads was possible from measurements carried out in the North of Brazil.*

Index Terms— *Simulador, Qualidade da Energia, ATP Draw.*

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia tornou-se uma das grandes preocupações para os consumidores de energia elétrica. Pois o fornecimento de energia sem qualidade pode resultar em instabilidades, mau funcionamento e diminuição da vida útil dos equipamentos elétricos. Isso tudo devido a alterações manifestados na tensão, corrente ou na frequência [1, 2].

A disponibilidade da energia elétrica possibilita no incremento da qualidade de vida da sociedade. Por isso, quando é disponibilizada energia através de um sistema de distribuição, observam-se inúmeros benefícios para a melhoria de vida [3].

Juntamente com esse aumento, o Brasil tem passado por grandes mudanças quanto as suas características em relação às cargas. Pois, anteriormente, o setor industrial apresentava um maior consumo de energia elétrica com distorções harmônicas de corrente quando comparadas aos consumidores residenciais e comerciais [4]. No entanto com o passar dos anos essa situação foi revertida, pois o consumidor residencial apresenta maiores valores de distorções harmônicas [5].

Atualmente, é comum observar nos consumidores residenciais o uso de equipamentos baseado na eletrônica de potência, como fornos de micro-ondas, computadores, televisores, condicionadores de ar e outros. Esses tipos de cargas possuem uma característica intrínseca que é a não linearidade [2]. As cargas não lineares são responsáveis por produzirem correntes distorcidas (não senoidais) mesmo quando energizadas por uma fonte puramente senoidal. Isso ocorre quando correntes distorcidas fluem através da impedância entre a fonte e a carga, podendo alterar a conformidade senoidal da tensão na barra de carga ou ponto comum de conexão [6].

Esses tipos de cargas são as principais responsáveis pela distorção de correntes e tensões dos sistemas elétricos [7], colaborando para a redução da eficiência nas redes elétricas e contribuindo para o aumento de perdas elétricas.

Por isso, tem-se percebido um aumento de preocupações quanto à qualidade da energia para a manutenção de sua conformidade. Para a avaliação de um sistema elétrico quanto a sua conformidade dos indicadores de energia elétrica podem ser realizadas de duas maneiras, através de medições e por simulações. As medições identificam a presença de distorções de tensão e corrente, fornecendo um diagnóstico real do sistema.

A simulação é utilizada para suprir ou complementar os resultados apresentados pelas medições. O que justifica a importância de estudos para identificar possíveis cargas não lineares que contribuem negativamente na qualidade da energia em uma rede de distribuição [8].

A partir disso, é importante salientar que as distorções harmônicas no sistema de distribuição podem acarretar em diversas falhas em equipamentos, tais como: sobreaquecimento dos condutores, alteração do torque, ruídos em motores elétricos e danificação de bancos de capacitores devido aos fenômenos de ressonância [9]. Nessa perspectiva, são estabelecidos limites máximos de corrente e tensão como em [10, 11].

Com isso, estudos de propagação harmônica nos SEP podem ser realizados por intermédio de simulações digitais, usando modelos representativos dos elementos e topologias da rede elétrica. Onde são calculados os harmônicos e sua propagação pelo sistema, sendo possível mapear os níveis de distorção harmônica em diversos pontos da rede, identificando os que apresentam maior severidade [12].

Portanto, esse trabalho tem por objetivo demonstrar o estudo de propagação harmônica em um sistema de

D. de S. Lima desenvolve o mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil (diorgelima@ufpa.br).

R. L. de S. Carvalho, A. R. A. Manito e T. M. Soares trabalham no CEAMAZON – Centro de Excelência e Eficiência Energética da Amazônia, Belém, Brasil (e-mail: rodcarvalho@ufpa.br, allanmanito@ufpa.br, thiagosoares@ufpa.br).

U. H. Bezerra é professor titular em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil (e-mail: bira@ufpa.br).

distribuição industrial balanceado de 13 barras [13], para a injeção de correntes harmônicas que variam no tempo. Os valores de correntes harmônicas foram obtidos a partir de um banco de medições realizada em um sistema de distribuição localizada na região norte do Brasil.

II. HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Concomitante ao aumento da capacidade de geração, transmissão e distribuição há um aumento das cargas não lineares nos diversos níveis de distribuição. O que é justificado com a ampliação de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência para seu funcionamento [5]. Essas cargas reduzem a eficiência nas redes, devido ao aumento das perdas elétricas provocadas pelo efeito pelicular, além de provocarem efeitos, como: ressonâncias harmônicas, interferências, vibrações, ruídos, fadiga em transformadores, reatores e motores [9].

O setor industrial brasileiro, na década de 80, teve o maior consumo de energia elétrica com distorções harmônicas de correntes quando comparadas aos demais consumidores [14]. No entanto, atualmente o cenário encontra-se diferente, pois os consumidores residenciais e comerciais apresentaram um crescimento expressivo de cargas com características não lineares [15]. Esse crescimento tem sido acompanhado em um estudo nos Estados Unidos, sendo apresentado o crescimento das cargas eletrônicas pela potência instalada [16], conforme a Figura 1.

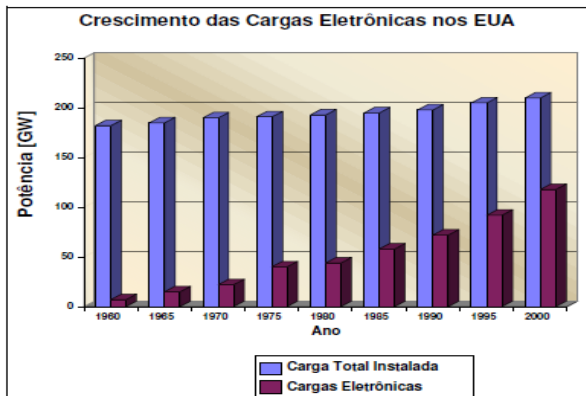


Fig. 1. Crescimento das cargas eletrônicas nos Estados Unidos da América [16].

A presença dos harmônicos no sistema elétrico provoca distorções na forma de onda de tensão e da corrente. As cargas não lineares embora alimentadas por fontes puramente senoidais, absorvem uma corrente distorcida [14].

Uma forma de analisar a distorção harmônica é através da aplicação da análise de Fourier. Essa técnica permite a conversão de uma forma de onda no domínio do tempo em suas componentes de frequência. Assim, sendo possível a decomposição da forma de onda em suas respectivas componentes [15, 17].

A Figura 2 demonstra as formas de ondas para cada múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. Essa soma refere-se como uma série de Fourier.

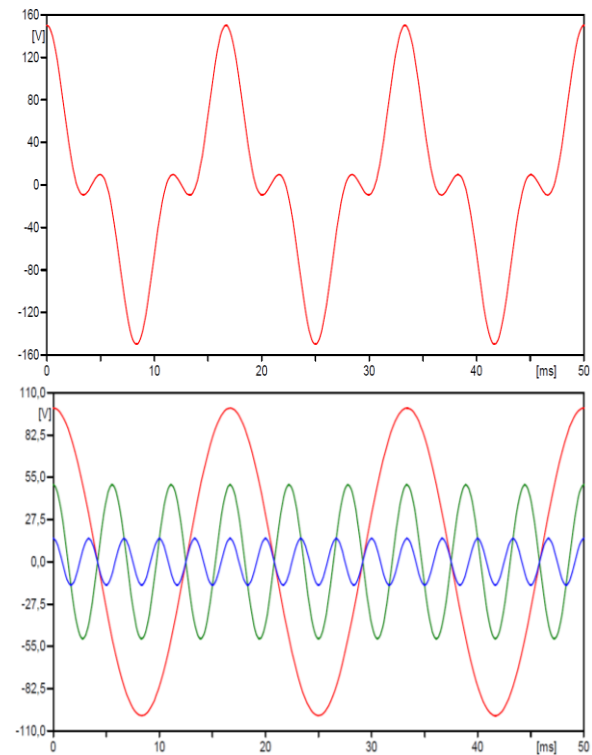


Fig. 2. Formas de ondas de tensão com harmônicos e suas componentes.

III. MODELAGEM COMPUTACIONAL

O sistema utilizado para a modelagem consiste no Sistema de Distribuição Industrial Balanceado de 13 Barras (BIDS) [13,15]. A partir disso, pode-se modelar o sistema para avaliar o comportamento das tensões harmônicas nos barramentos de interesse, assim como avaliar a contribuição da própria rede quando se encontra saturada.

As cargas não lineares serão representadas por fontes de correntes harmônicas conectadas aos barramentos. Essas correntes foram obtidas através de medições realizadas em uma rede de distribuição da região norte do Brasil. O simulador possibilitará diferentes configurações de análises para avaliar a contribuição individual das cargas ou mesmo a contribuição do sistema.

Para isso, será utilizada a plataforma do software ATP para as simulações digitais no domínio da frequência para o fluxo de carga harmônico.

A. Modelagem no Software ATP

O software ATP foi originado na década de 60 por Herman W. Dommel [18, 19]. Atualmente, um dos programas mais utilizado para simulação computacional de fenômenos em regime permanente ou mesmo transitórios eletromagnéticos [20]. Também podem ser representadas redes complexas e sistemas de controle de diversas estruturas, pois o mesmo dispõe de diversos modelos inclusos.

As modelagens disponíveis na literatura para análise harmônica podem ser no domínio do tempo, apresentando uma integração em tempo discretizado, a estabilidade e a precisão dependem do passo de cálculo adotado e a solução pode

divergir caso seja escolhido um tempo impróprio.

A outra maneira é no domínio da frequência, uma solução mais robusta, pois é encontrada para cada frequência individualmente, logo os erros não serão acumulados. Portanto, as análises harmônicas no domínio da frequência operam diretamente com os fasores de tensão e corrente. Este método é relativamente rápido, pois o tempo de simulação depende diretamente da quantidade de harmônicos simulados. A Fig. 3 mostra o sistema de distribuição industrial balanceado de 13 barras modelado no ATP Draw.

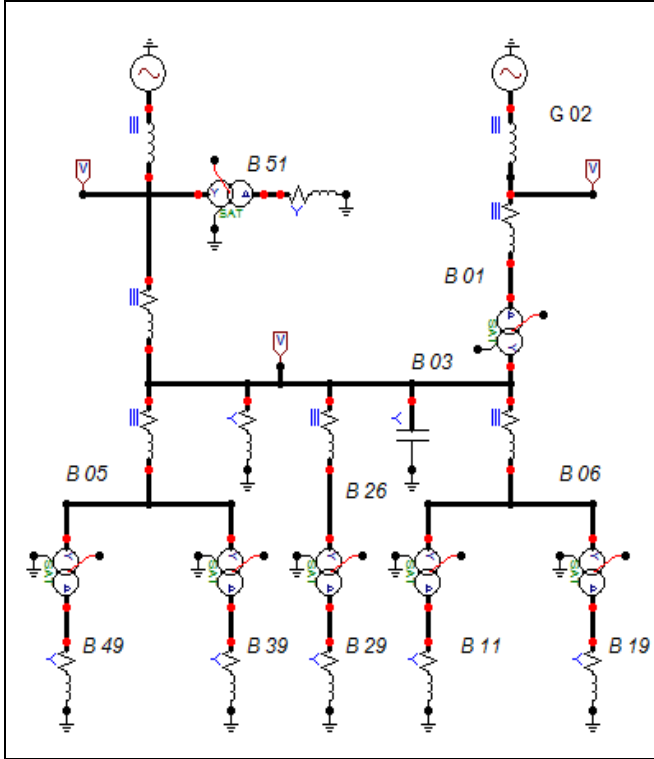


Fig. 3. Modelagem no ATP Draw o sistema de distribuição industrial balanceado de 13 barras.

B. Modelos de Componentes da Rede Elétrica

Neste tópico serão apresentados modelos de linhas e cabos, transformadores, banco de capacitores, cargas e fontes de geração para estudos de penetração harmônica para as frequências de interesse do sistema de distribuição.

1) Modelos de Linhas e Cabos

Os modelos de linhas e cabos devem ser representáveis através de seus circuitos, conforme a Fig. 4. A admitância série compreende por uma resistência em série com uma reatância, inseridas entre dois pontos da rede que conecta a linha por dois capacitores, que devem estar conectados entre estes pontos e o ponto de tensão de referência. Cada capacitor é equivalente à metade da capacitância correspondente à potência reativa gerada [21].

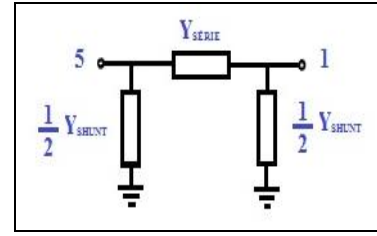


Fig. 4. Circuito equivalente- π para linhas e cabos.

2) Modelos de Banco de Capacitores

Os capacitores serão inseridos com compensação em paralelo. Para isso, deve ser representado somente por sua capacitância equivalente, com o modelo conveniente inserido no sistema [21].

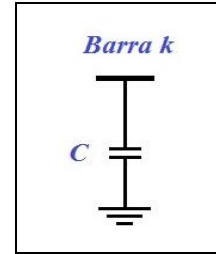


Fig. 5. Modelo de capacitor em compensação paralela.

3) Modelos de Cargas

As cargas são utilizadas para representar de forma simplificada os consumidores e esta representação altera significativamente a natureza do fluxo de correntes harmônicas [22, 23].

Geralmente, são expressas por suas potências ativa e reativa, utilizadas para calcular os parâmetros do circuito equivalente para estudos de fluxo de carga à frequência fundamental, partindo-se da tensão nominal. O modelo que considera as cargas em paralelo é o mais adequado, já que é um sistema industrial.

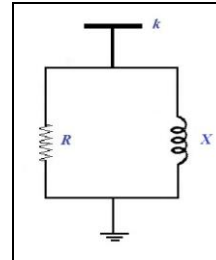


Fig. 6. Modelo utilizado para a representação de cargas.

Para este modelo, utilizam-se as Eq. (1) e (2) para o cálculo da resistência e reatância obtidas a partir das potências ativa e reativa [21].

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

$$X = \frac{V^2}{Q} \quad (2)$$

4) Modelos de Transformadores

Os transformadores normalmente são modelados por uma resistência em série com a indutância de dispersão, como demonstrado na Fig. 7.

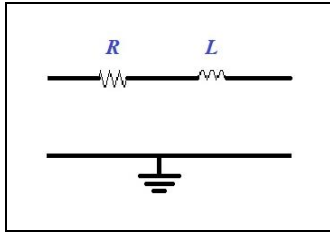


Fig. 7. Modelo para transformadores.

Para o cálculo da resistência e indutância em relação ao primário do transformador, é realizado através da Eq. (3). Para encontrar do lado secundário, basta utilizar a impedância base do secundário [21].

$$Z_{T(P)} = (R + j \cdot X) \cdot Z_{base} \quad (3)$$

$$L = \frac{X}{2 \cdot 377} \quad [mH] \quad (4)$$

Será adicionada a curva de magnetização dos transformadores, conforme a Fig. 8, para avaliar a contribuição desses equipamentos na distorção harmônica da forma de onda quando operam em saturação.

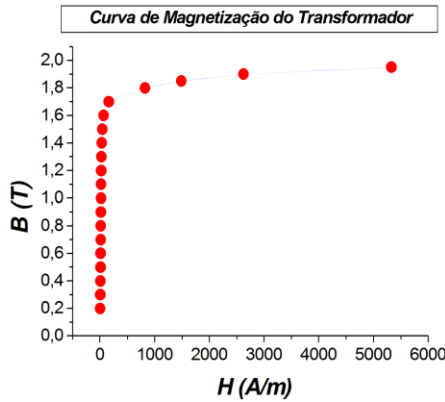


Fig. 8. Curva de magnetização do transformador de potência.

C. Funcionalidade do Simulador

O objetivo do simulador é auxiliar e facilitar diferentes simulações para estudos de cargas harmônicas conectadas na rede de distribuição. A Fig. 9 demonstra o fluxograma sobre o funcionamento do simulador.

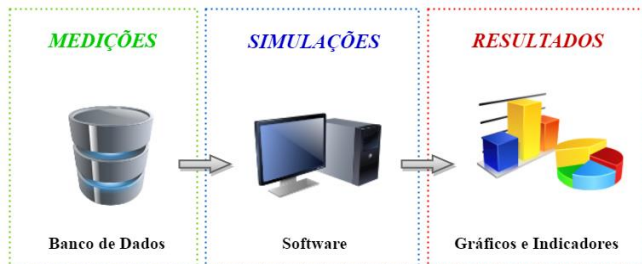


Fig. 9. Fluxograma da funcionalidade do simulador de qualidade da energia.

Dessa forma, será utilizado um banco de dados contendo medições com valores de correntes harmônicas em uma rede de distribuição da região norte do Brasil. Essas correntes harmônicas serão inseridas no sistema e em seguida o software ATP realizará simulações e como respostas serão

demonstradas as tensões harmônicas nos barramentos de interesse. As análises serão realizadas no domínio da frequência, pois de acordo com [24] é a maneira mais adequada para avaliar os efeitos das fontes harmônicas em sistemas elétricos.

D. Interface Gráfica

O software desenvolvido utiliza a linguagem de programação Java com o paradigma de programa orientado a objetos (POO). Esse tipo de programação introduz a característica de herança, ou seja, reutilizando um software de uma nova classe para aprimorá-lo a uma classe existente. Isso contribui para economia de tempo e para o desenvolvimento de novas classes, aumentando a probabilidade de um sistema ser implementado e mantido efetivamente [25]. Na Fig. 10 é demonstrada a tela de inicialização do simulador, permitindo as opções de iniciar ou finalizar.

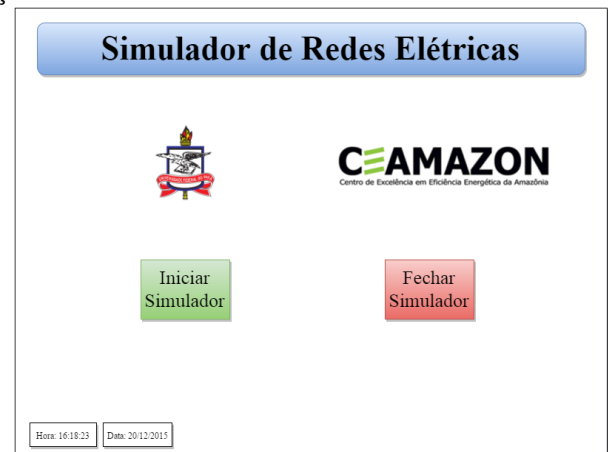


Fig. 10. Tela inicial do simulador de redes elétricas.

Ao selecionar a opção de iniciar simulador, é disponibilizado ao usuário três opções, como: carregar rede, onde o usuário iniciará análises em uma rede; editar rede, caso deseje criar uma nova rede e excluir rede. O principal objetivo do simulador é facilitar diferentes tipos de análises ao usuário. Com isso, na entrada de dados às chances de erros serão minimizadas através da ferramenta.

O passo seguinte é selecionar a barra de carga que será responsável pela injeção de corrente harmônica no sistema. Juntamente, deve ser fornecido o banco de dados com os valores de amplitudes e ângulo de cada componente harmônico. A Figura 11 demonstra essa funcionalidade do simulador.

Isso tudo facilitará os estudos para avaliar a contribuição individual e coletiva das cargas, assim como a própria contribuição da rede, nas distorções harmônicas de tensões nos barramentos de interesse.

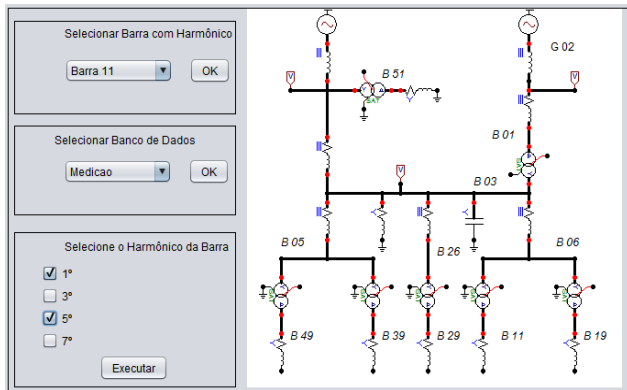


Fig. 11. Tela disponibilizada pelo simulador para edição de redes elétricas do modelo.

IV. RESULTADOS

Tendo como o principal objetivo do simulador desenvolver uma ferramenta que possa auxiliar em diferentes tipos de configurações para uma determinada rede em estudo. Portanto, utilizou-se um banco de dados a partir de medições realizado em uma rede de distribuição da região norte de Brasil. A Fig. 12 demonstra a taxa de distorção harmônica de corrente fornecida nessa medição, que são predominantemente de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

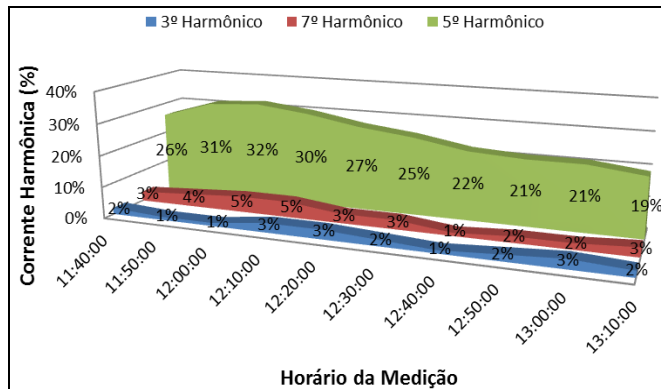


Fig. 12. Valores de correntes harmônicas obtidas por uma campanha de medição.

A partir das simulações utilizando a curva de correntes harmônicas, gerou-se os arquivos de saída (.LIS), proporcionando a avaliação do comportamento de distorção dos níveis de tensão em barramento de interesse. Na Fig. 13 são demonstradas as tensões no barramento (B 49) quando conectado uma carga harmônica no mesmo.

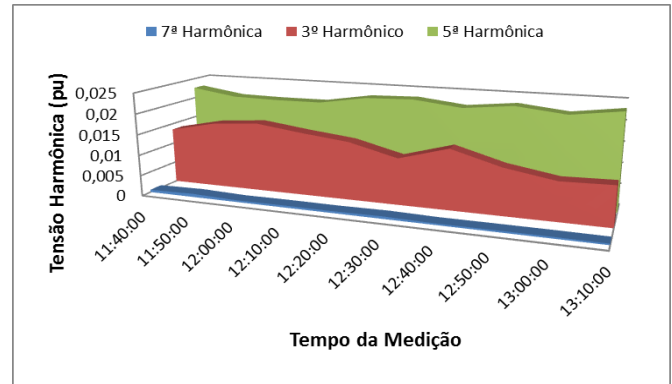


Fig. 13. Valores das tensões harmônicas para o sistema com carga harmônica no barramento (B 49).

A seguir será demonstrada uma análise com duas cargas harmônicas conectadas nos barramentos (B 49) e (B 39), conforme a Fig. 14.

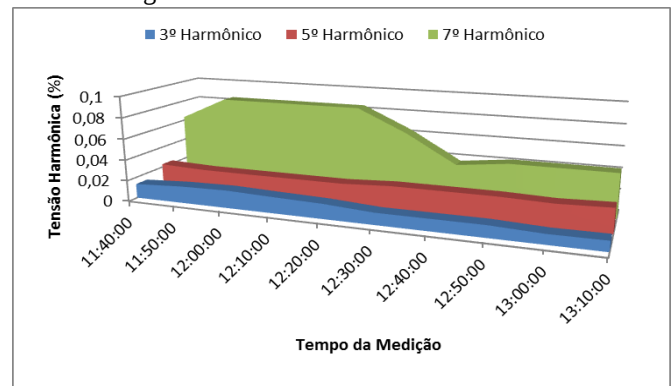


Fig. 14. Valores de tensões harmônicas para o sistema com carga harmônica em dois barramentos (B 49 e B 39).

Para avaliar a contribuição da rede para a distorção harmônica quando opera em saturação. Utilizou-se a primeira condição, com somente uma carga harmônica conectada a (B49), operando com saturação de 40% acima da condição nominal, resultado demonstrado na Fig. 15.

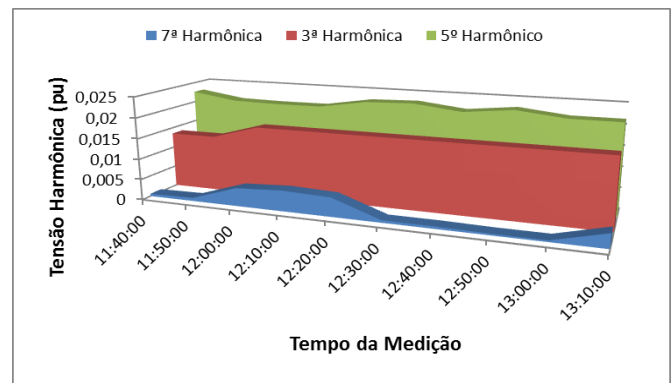


Fig. 15. Valores de correntes harmônicas obtidas por uma campanha de medição.

Ao comparar a Fig. 13 com a Fig. 15, observa-se que com a saturação da rede de distribuição, os harmônicos de 3ª e 7ª ordem aumentaram em pequenas proporções.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao crescimento de cargas não lineares conectadas as redes de distribuição, justificado pela substituição por equipamentos cada vez mais eficientes que utilizam da eletrônica de potência para isso, é de grande valia a utilização de metodologias para avaliar o sistema elétrico quanto a sua conformidade de indicadores de energia. Uma das formas para realizar esta avaliação é por intermédio de simulações, através de estudos computacionais de redes elétricas.

Portanto, neste trabalho foi apresentado uma análise de penetração de harmônicos em um sistema de distribuição. Para a obtenção correta de resultados, os componentes elétricos do sistema devem ser representados fielmente. Assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia de um simulador de redes elétricas para a propagação de harmônicos no ATP Draw. Com isso, foram avaliadas as distorções harmônicas de tensão para as correntes harmônicas injetadas a partir de um banco de dados.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] R. P. S. LEÃO, R. F. SAMPAIO, F. L. M. ANTUNES. **Harmônicos Em Sistemas Elétricos**. Editora Elsevier, 2014. 354p.
- [2] A. GHOSH and G. LEDWICH, "A unified power quality conditioner (UPQC) for simultaneous voltage and current compensation," *Elect Power Syst. Res.*, vol. 59, no. 1, pp. 55–63, 2001.
- [3] MEHL, E. L. M. "Qualidade da Energia Elétrica" Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPR, 2013.
- [4] G. A. MENDONÇA, "Avaliação das Abordagens Empregadas em Estudos de Propagação Harmônica em Sistemas Elétricos". Dissertação de Mestrado. P 125. Belo Horizonte – Minas Gerais, Março de 2012.
- [5] M. L. y GONZALEZ, S. R. SILVA, I. A. PIRES, "Correntes harmônicas em Aparelhos Eletrodomésticos", in *Proc. VI SBQEE- VI Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia*, Belém, Pará, 2005.
- [6] BAGGINI, A. **Handbook of Power Quality**. John Wiley & Sons, 2008. 618p.
- [7] E. L. OWEN, "History of Harmonics in Power Systems", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, Issue 1, pp. 6-12, 1998.
- [8] C. R. DUGAN, F. M. MCGRANAGHAN, S. SURYA, H. B. WAYNE. *Electrical Power Systems Quality*. Second Edition Mc Graw-Hill, 2004.
- [9] J. ARRILLAGA, N. R. WATSON, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, 2003.
- [10] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia*, 2014.
- [11] IEEE Standard 399-1997, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis", IEEE, New York, 1997.
- [12] DUFEY, C.K. e STRATFORD, R.P. (1989). "Update of harmonic standard IEEE-519: Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems". *IEEE Transactions on Industry and Applications*, vol.25, no.6, pp.1025-1033.
- [13] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part 1 & 2", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 11, No. 1 Jan. 1996, pp. 452-474.
- [14] BEN – Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia – MME/ Empresa de pesquisa Energética – EPE, 2015.
- [15] D. de S. LIMA, A. R. A. MANITO, T. M. SOARES, U. H. BEZERRA, "Simulador para Estudos de Propagação Harmônica e Análise de Impactos de Cargas Não Lineares em Redes Elétricas". *The XI LATIN-AMERICAN Congress Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE – São José dos Campos – SP, Brasil*, 2015.
- [16] GARCIA, F. R. "Harmônicos em Sistema Elétricos de Potência: Causas, Efeitos e Soluções". *Especialização em Engenharia Elétrica*. Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Brasil. 1996.
- [17] T. M. SOARES. "Estimação da Contribuição de Múltiplas Fontes Harmônicas Utilizando Regressão Não Paramétrica". *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. 2012.
- [18] H. W. DOMMEL. "Electro-Magnetic Transients Program - EMTP Theory Book", *Bonneville Power Administration, Portland*, 1986.
- [19] RULE BOOK. *Alternative Transients Program*. [s.1] Leuven EMPT Center, 1987.

- [20] B. S. B. ABDULLAH, "Transmission Line Models for Coordination of Surge Protective Devices". 2005.
- [21] TOSTES, M. E. de L. "Avaliação dos Impactos Causados Pela Geração de Harmônicos na Rede de Distribuição em Consumidores em Baixa Tensão." 2003. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal do Pará – 2003, 184p. Belém – Pará – Brasil.
- [22] MEDONÇA, G. A. "Avaliação das Abordagens Empregadas em Estudos de Propagação Harmônica em Sistemas Elétricos". 2012. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – 2012, 125p. Belo Horizonte – MG – Brasil.
- [23] A. S. NETO, A. B. FERNANDES, "Efeito da Modelagem da Carga para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Transmissão", *XIII ERIAC - XIII Encontro Regional Ibero-Americano de CIGRÉ*, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
- [24] LA ROSA, C. F. (2006). **Harmonics and Power Systems**. First Edition, Taylor & Francis Group, LLC.
- [25] P. DEITEL & H. DEITEL, **J. Java: Como Programar**. Ed. 8ª. Editora: Pearson Education, 2010.

VII. BIOGRAFIA



Diorge de Souza Lima, nasceu em Santa Maria do Pará, Brasil em 1992. Graduado pela Universidade Federal do Pará em Engenharia Elétrica no ano de 2014. Atualmente, desenvolve o mestrado também na Universidade Federal do Pará em Sistemas Elétricos de Potência. Seus principais interesses em pesquisa são: distúrbios de qualidade de energia, eficiência energética, geração distribuída e energias renováveis, estudo de comportamento dos equipamentos elétricos e método de elementos finitos.



Rodrigo Luis da Silva Carvalho, nasceu em Belém Pará, Brasil em 1989. Graduado pelo Instituto de Estudos Superiores da Amazônia em Engenharia de Computação no ano de 2014. Atualmente, participar de pesquisa P&D no CEAMAZON na Universidade Federal do Pará. Seus principais interesses em pesquisa são: distúrbios de qualidade de energia, mineração de dados e inteligência computacional.



Allan Rodrigo Arrifano Manito nasceu em Belém-PA - Brasil, em 1982. Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2006, Concluiu o mestrado em 2009 e atualmente cursa o doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da mesma Universidade, atuando principalmente na linha de pesquisa de qualidade da energia elétrica.



Thiago Mota Soares, nasceu em Belém – Pará, Brasil em 1985. Graduado pela Universidade Federal do Pará em engenharia elétrica. Obteve o título de mestrado pela Universidade Federal do Pará, no Brasil, sistemas elétricos de potência. Atualmente, desenvolve doutorando e é engenheiro eletricista na Universidade Federal do Pará e seus principais interesses em pesquisa são: distúrbios de qualidade de energia, eficiência energética, geração distribuída e energias renováveis.



Ubiratan Holanda Bezerra, nasceu em Pereira - Ceará - Brasil em 1950. Graduado pela Universidade Federal do Pará (UFPA) - Brasil em engenharia elétrica. Obteve o título de mestrado e doutorado pela Universidade Federal de Itajubá e Universidade Federal do Rio de Janeiro. É professor titular na Universidade Federal do Pará e seus principais interesses na área de pesquisa são: avaliação da segurança em sistemas de potência, distúrbios de qualidade de energia, geração distribuída e energias renováveis.